

**EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO  
MASIVO: ESTUDIO NUEVO PUENTE PUMAREJO**



**DIEGO ALEJANDRO RODRIGUEZ CABARCAS**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2019**

**EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO  
MASIVO: ESTUDIO DEL NUEVO PUENTE PUMAREJO**

**DIEGO ALEJANDRO RODRIGUEZ CABARCAS**

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**ING. DIEGO PEREIRA GARCIA  
DIRECTOR DE TESIS**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA – CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA**

**2019**

### **Agradecimientos**

Más allá de la noche que me cubre,  
Negra como un abismo profundo,  
Agradezco a cualquier Dios que pudiera existir  
Por mi alma invicta.  
En las feroces garras de la circunstancia  
Ni he gemido ni he gritado.  
Bajo los golpes del azar  
Mi cabeza sangra, pero no se inclina.  
Más allá de este lugar de ira y lágrimas  
Es inminente el Horror de la sombra,  
Y sin embargo la amenaza de los años  
Me encuentra y me encontrará sin miedo.  
No importa cuán estrecho sea el portal,  
Cuán cargada de castigos la sentencia.  
Soy el amo de mi destino:  
Soy el capitán de mi alma.

William Ernest Henley.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma Presidente del Jurado

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Barranquilla, 26 de mayo de 2019

## Resumen

La evaluación termodinámica de las estructuras de concreto masivo del nuevo Puente Pumarejo se centró en el análisis de las bases de las pilas principales del mismo, específicamente en los pilonos 13 y 14; estas evaluaciones termodinámicas se realizaron por medio de termómetros especiales ubicados y distribuidos en las diferentes fases de hormigonados de los encepados. Los encepados son un elemento estructural fuertemente armado que tiene como principal función enlazar grupos de pilotes, se comporta como una zapata y además sirve de base para los pilonos; los encepados de los pilonos fueron fundidos en 3 fases debido a su alto volumen de concreto, por lo que se les da el nombre de concretos masivos. El presente proyecto investigativo comprende el desarrollo continuo de diferentes etapas que inicia desde la recopilación bibliográfica y revisión de las temperaturas obtenidas en cada fase de hormigonado de estos elementos estructurales, elaboración de gráficas, determinación de las correlaciones y análisis de los resultados que permita integrar todos los en un modelo estadístico. Se desarrollaron entre 8 – 10 puntos de ensayos termodinámicos por cada fase de fundida en los encepados de los dos pilonos principales utilizando una termocupla tipo K, que cuenta con un sensor de temperatura capaz de almacenar información cada cierto tiempo definido, para este caso, cada 10 minutos las termocuplas marcaban la temperatura del elemento en la posición que se encontrara. El encepado tiene una altura de 6.5m. Cada fase de fundida se hizo de 1.25m y las termocuplas generalmente se posicionaban a la mitad de la altura de cada fase, es decir; 0.6m para la fase 1, 1.25m para la fase 2 y 2.65m para la fase 3. A su vez, la temperatura ambiente también fue tomada en cada medición. Las temperaturas máximas no sobrepasaron el límite de colocación de concreto establecido por la ACI de 70°C.

Debido a las condiciones geográficas del proyecto, su cercanía con el mar y la humedad de la zona se hace necesario bajar los niveles de temperatura del hormigón, esto tiene como objetivo evitar la fisuración por retracción. En el nuevo Puente Pumarejo el control y manejo de la temperatura se logró tomando medidas tales como; cambiar un porcentaje de agua por hielo en la mezcla, humedecer el tambor de los camiones mixer, ensombrecer áridos con polisombra y humectarlos, reemplazo de cemento por escorias de horno. Al generar estos cambios en el tratado de los materiales y los equipos que intervienen en el proceso de fabricación del concreto se obtuvieron temperaturas de vaciado de  $27,7^{\circ}\text{C}$  y de ambiente de unos  $27,9^{\circ}\text{C}$ , y el promedio de temperatura máxima es de  $63,5^{\circ}\text{C}$  en los elementos.

***Palabras clave:*** Concreto masivo, termodinámica, puente, temperatura, modelo estadístico, hormigón, encepado

### **Abstract**

The thermodynamic evaluation of the massive concrete structures of the New Pumarejo Bridge considers its study in the bases of the main piles of the same, specifically in piles 13 and 14, these thermodynamic evaluations were carried out by means of special thermometers located and distributed in the different phases of concreting of the pile caps; the pile caps are a strongly reinforced structural element whose main function is to link groups of piles, it behaves like a shoe and also serves as a base for the piles; the pile caps of the pylons were cast in 3 phases due to their high volume of concrete, for which reason they are given the name of massive concrete. This research includes the continuous development of different stages that starts from the bibliographic collection and review of the temperatures obtained in each phase of concreting of these structural elements, elaboration of graphs, correlations, and analysis of the results that allows integrating all the results in a model statistical. Between 8 - 10 points of thermodynamic tests were carried out for each phase of casting in the caps of the two main piles using a thermocouple type K, which are a temperature sensor capable of storing information every certain time defined, for this case every 10 minutes the thermocouples marked the temperature of the element in the position that it was. The pile cap has a height of 4.5m, each phase of casting was made every 1.25m and the thermocouples were generally positioned at half the height of each phase, ie; 0.6m for phase 1, 1.25m for phase 2 and 2.25m for phase 3. In turn, the ambient temperature was also taken at each measurement. The maximum temperatures did not exceed the concrete placement limit established by the ACI of 70°C. Due to the geographic conditions of the project, its proximity to the sea and the humidity of the area, it is necessary to lower the temperature levels of the concrete. In the New Pumarejo Bridge the control and handling of the temperature were achieved by taking measures such as; change a percentage of water for ice in

the mix, moisten the drum of the mixer trucks, shade aggregates with a cloth and wet them, replace cement with kiln slag. By generating these changes in the treatment of materials and equipment involved in the process of manufacturing the concrete were obtained casting temperatures of  $27.7^{\circ}\text{C}$  and an ambient of about  $27.9^{\circ}\text{C}$ , and the average maximum temperature it is  $63.5^{\circ}\text{C}$  in the element.

**Keywords:** Massive concrete, thermodynamics, bridge, temperature, statical model, concrete, pile cap



## Contenido

<b>Lista de tablas y figuras.....</b>	<b>11</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>Esquema general del proyecto .....</b>	<b>16</b>
<b>Generalidades del proyecto .....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>18</b>
<b>Aspectos Generales del Proyecto .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.1. Objetivo General.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.2. Objetivos Especificos .....</b>	<b>24</b>
<b>1.3. Justificación. ....</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>27</b>
<b>Marco de referencia .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. Antecedentes .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. Marco teórico.....</b>	<b>31</b>
<b>2.2.1 Dimensiones estructurales.....</b>	<b>33</b>
<b>2.2.2 Agregados. ....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.3 Concreto.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.4 Concreto estructural.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.5 Durabilidad.....</b>	<b>35</b>
<b>2.2.6 Generación de calor. ....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.7 Temperatura.....</b>	<b>37</b>

2.2.8	Concretos masivos.....	38
2.3.	Marco legal.....	39
2.3.1	Guía de hormigón en masa /aci 207.1r.....	39
2.3.2	Efectos térmicos y cambio de volumen en el agrietamiento del concreto en masa aci 207 2r.....	47
2.3.3	Especificaciones del hormigonado para clima caliente y/o cálido – aci 305....	51
Capítulo 3.....		52
Metodología aplicada.....		52
3.1.	Tipo de investigación.....	52
3.2.	Diseño de la investigación .....	52
3.3.	Alcances y limitaciones .....	54
Capítulo 4.....		56
Análisis de resultados .....		56
4.1.	Encepado pila 13 fase 1.....	57
4.2.	Encepado pila 13 fase 2.....	65
4.3.	Encepado pila 13 fase 3.....	72
4.4.	Encepado pila 14 fase 1.....	80
4.5.	Encepado pila 14 fase 2.....	86
4.6.	Encepado pila 14 fase 3.....	92
4.7.	Evolución de temperatura en los encepados del nuevo Puente Pumarejo .....	98
Conclusiones .....		102
Recomendaciones .....		104
Referencias.....		105
Anexos .....		113

## Lista de tablas y figuras

### Tablas

Tabla 1. Temperaturas máximas de colocación de concreto.....	39
Tabla 2. Equivalencia de tipos de cemento.....	41
Tabla 3. Requisitos de desempeño del cemento, valores típicos. ....	42
Tabla 5. Termocuplas en Fase 1, P13 .....	57
Tabla 6. Termocuplas en Fase 2, P13 .....	65
Tabla 7. Termocuplas en Fase 3, P13 .....	72
Tabla 8. Termocuplas en Fase 1, P14 .....	80
Tabla 9. Termocuplas en Fase 2, P14 .....	86
Tabla 10. Termocuplas en Fase 3, P14 .....	92
Tabla 11. Temperaturas máximas alcanzadas en encepados del nuevo Puente Pumarejo.....	101

### Figuras

Figura 1. Vista frontal ubicación general de las Pilas.....	16
Figura 2. Vista en Planta ubicación general de las Pilas.....	16
Figura 3. Esquema general torres de atirantamiento.....	17
Figura 4. Fases de hormigonado, Pilas 13 y 14. Nuevo Puente Pumarejo.....	21
Figura 5. Vista en planta Fase 1 y 2.....	23
Figura 6. (A) Dimensiones de la Fase 3; (B) Dimensiones del lastre.....	23
Figura 7. Ubicación recomendada para posicionamiento de control térmico. ....	46
Figura 8. Hidratación del cemento.....	50
Figura 9. Flujo de calor entre la temperatura de colocación y temperatura ambiente .....	51
Figura 10. Ubicación termocuplas en encepado Pila 13, Fase 1 (vista en planta) .....	59
Figura 11. Vista en perfil, Fase 1, Pila 13.....	59
Figura 12. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. Termómetro #1.....	60
Figura 13. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. Termómetro #2.....	61
Figura 14. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. Termómetro #3.....	62
Figura 15. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13.....	63
Figura 16. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F1 P13.....	64
Figura 17. Ubicación termocuplas en encepado Pila 13, Fase 2 (vista en planta). ....	65
Figura 18. Vista en perfil, Fase 2, Pila 13.....	66
Figura 19. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #1.....	67
Figura 20. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #2.....	68
Figura 21. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #3.....	69
Figura 22. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo, en fase 2, P13.....	70
Figura 23. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F2 P13 .....	71
Figura 24. Ubicación termocuplas en encepado Pila 13, Fase 3 (vista en planta). ....	72
Figura 25. Vista en perfil, Fase 3, Pila 13.....	73
Figura 26. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #1.....	74
Figura 27. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #2.....	75

Figura 28. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #3. ....	76
Figura 29. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #4. ....	77
Figura 30. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. ....	78
Figura 31. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F3 P13 .....	79
Figura 32. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14, Fase 1 (vista en planta) .....	80
Figura 33. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #1. ....	81
Figura 34. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #2. ....	82
Figura 35. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #3. ....	83
Figura 36. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. ....	84
Figura 37. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F1 P14. ....	85
Figura 38. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14 fase 2 (vista en planta). ....	86
Figura 39. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #1. ....	87
Figura 40. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #2. ....	88
Figura 41. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #3. ....	89
Figura 42. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. ....	90
Figura 43. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F2 P14. ....	91
Figura 44. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14 fase 3 (vista en planta). ....	92
Figura 45. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #1. ....	93
Figura 46. . Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #2. ....	94
Figura 47. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #3. ....	95
Figura 48. Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. ....	96
Figura 49. Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F3 P14. ....	97
Figura 50. Evolución histórica de las temperaturas máximas en los encepados del Nuevo Puente Pumarejo. ....	99

## Introducción

La obra del nuevo Puente Pumarejo es una obra civil pública licitada bajo el nombre: *“construcción de las obras de infraestructura vial para la solución integral del paso sobre el río magdalena en barranquilla, en la carretera barranquilla – santa marta, ruta 9007. Departamentos atlántico y magdalena”*. Este proyecto de infraestructura vial departamental y mancomunal por excelencia atravesará el río Magdalena a la altura de Barranquilla y el municipio de Sitionuevo en el departamento del Magdalena. El objetivo principal de esta mega construcción es abrir paso a un canal navegable que mejore las rutas náuticas comerciales del país; con un gálibo aproximado de 45m, que permitirá cruzar embarcaciones tipo “handy size” podrán circular con facilidad y extender la capacidad de tránsito automotor vial en todas sus extensiones entre estos dos departamentos, respectivamente.

El nuevo Puente Pumarejo tendrá 24 pilas a lo largo de su extensión que soportaran un tablero de 38.1m de ancho en el tramo atirantado y de 2173m de longitud en el puente principal; para la sección vehicular se diseñó con 2 calzadas de 3 carriles cada una; con berma interna de 0.5m y berma externa de 1 m, zona peatonal 2m y ciclorruta 1.5m en ambos extremos de la sección. Las pilas número 13 y 14 son las estructuras más representativas del proyecto ya que tendrán 133,7m de altura donde nacerá el tramo atirantado de la estructura, la luz entre estas dos pilas es de 380m, mientras que las demás estructuras van a tener luces de 70m, por lo que las pilas 13 y 14 tienen especificaciones más exigentes, por ejemplo, el acero utilizado en los tirantes y la resistencia del concreto.

Para el caso específico de los encepados de las pilas en mención, se habla de estructuras de concreto masivo, *“Cualquier volumen de hormigón cuyas dimensiones son lo suficientemente grandes como para que sea necesario considerar la generación de calor provocada por la*

*hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen y tomar medidas a fin de minimizar la fisuración” (ACI-116, 2006)*

Estas estructuras generan altas temperaturas durante su fraguado, lo que causa cambios volumétricos diferenciales que por contar con restricción de movimiento libre (encofrado) en el momento de desencofrar se tendrá como resultado: deformaciones y tensiones que causan agrietamientos en la estructura diseñada, por lo que se han tenido que tomar medidas para garantizar el correcto funcionamiento de ellas, además de ensayos para medir la temperatura de estos.

*“Cuando se mezcla, en el concreto, el agua con el cemento, se lleva a cabo una reacción química exotérmica, es decir, se produce calor (calor de hidratación) y por consecuencia se eleva la temperatura del elemento fabricado, si el elemento no tiene la capacidad de disipar ese calor, por tratarse de una estructura de dimensiones “grandes”, se pueden alcanzar temperaturas que hagan cambiar su volumen provocando tensiones y por consecuencia agrietamientos que dañan las características deseadas en el concreto. También el diferencial de temperatura entre el interior del elemento y su superficie exterior es motivo de agrietamientos. (Ramírez, 2008)*

En este orden de ideas, el presente proyecto pretende evaluar el comportamiento térmico de las estructuras masivas del nuevo Puente Pumarejo, los encepados; que son un elemento estructural de cimentación que permite recoger los esfuerzos de los pilares de la estructura y transmitirlos a las cabezas de un grupo de pilotes y de esta manera transmitir esos esfuerzos al suelo, en el caso de las pilas 13 y 14, a través de 20 pilotes de 55m de longitud y 2.8m de diámetro.

Debido a la magnitud del proyecto, en cuanto al seguimiento de temperaturas, la norma ACI 76 es muy específica ya que define un rango de las temperaturas máximas y mínimas permisibles entre el elemento de concreto reforzado y el medio, 60°C. ACI76 (2018). De acuerdo con las observaciones de (Varona, Baena, & Ivorra, 2017) sobre menores resistencias del hormigón tras su exposición a altas temperaturas, se determinó que estas se deben a que la mayor hidratación de los componentes del hormigón hace que el deterioro producido por la deshidratación a alta temperatura sea más dañino, por lo que es necesario considerar las condiciones ambientales, ya que una alta temperatura ambiental tendrá como consecuencia una mayor demanda de agua del concreto y un incremento en la temperatura de dicho concreto en estado fresco; esto tiene como resultado un aumento en la velocidad de pérdida de fluidez y en una más rápida hidratación del cemento, lo cual conduce a un aceleramiento en el fraguado y en una menor resistencia del concreto, siendo este fenómeno nocivo para la funcionalidad del elemento estructural.

Resaltando que *la temperatura juega un papel muy importante en la trabajabilidad del concreto, dado que, en condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada consistencia o revenimiento. El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido por su efecto en la velocidad de la hidratación del cemento y también en la tasa de evaporación del agua* (Neville, 1999) (Ortiz Lozano, et al, 2007).

Se recomienda que la diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del concreto no debe exceder en ningún momento de 20°C. (Ramírez, 2008). Una vez la temperatura de la estructura sea  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  igual al ambiente, el choque térmico no debería afectar gravemente una vez el elemento estructural sea desencofrado y curado.

## Esquema general del proyecto

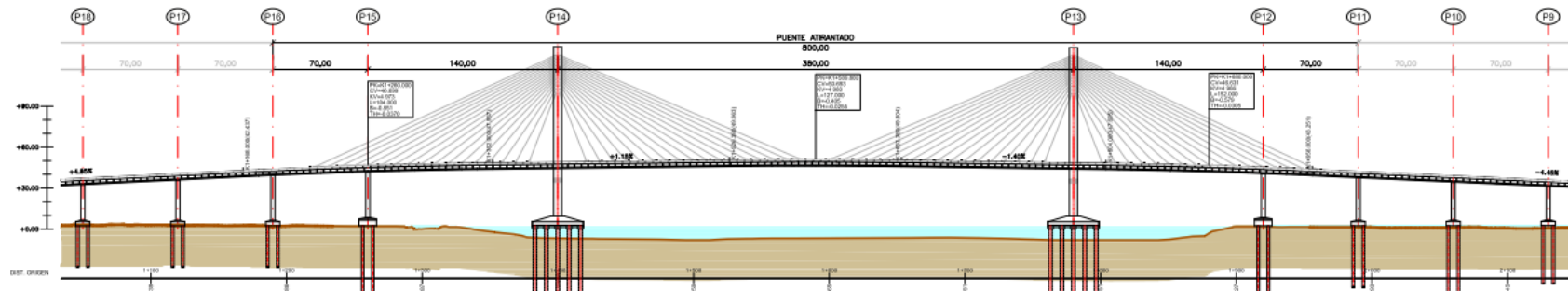


Figura 1. Vista frontal ubicación general de las Pilas. **Fuente.** Consorcio SES.

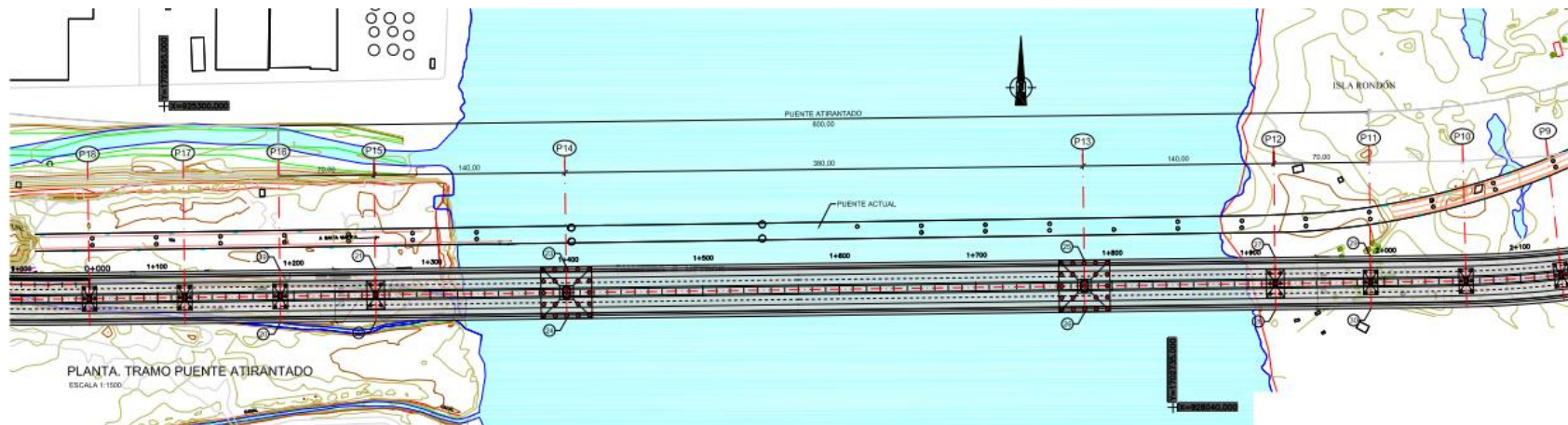
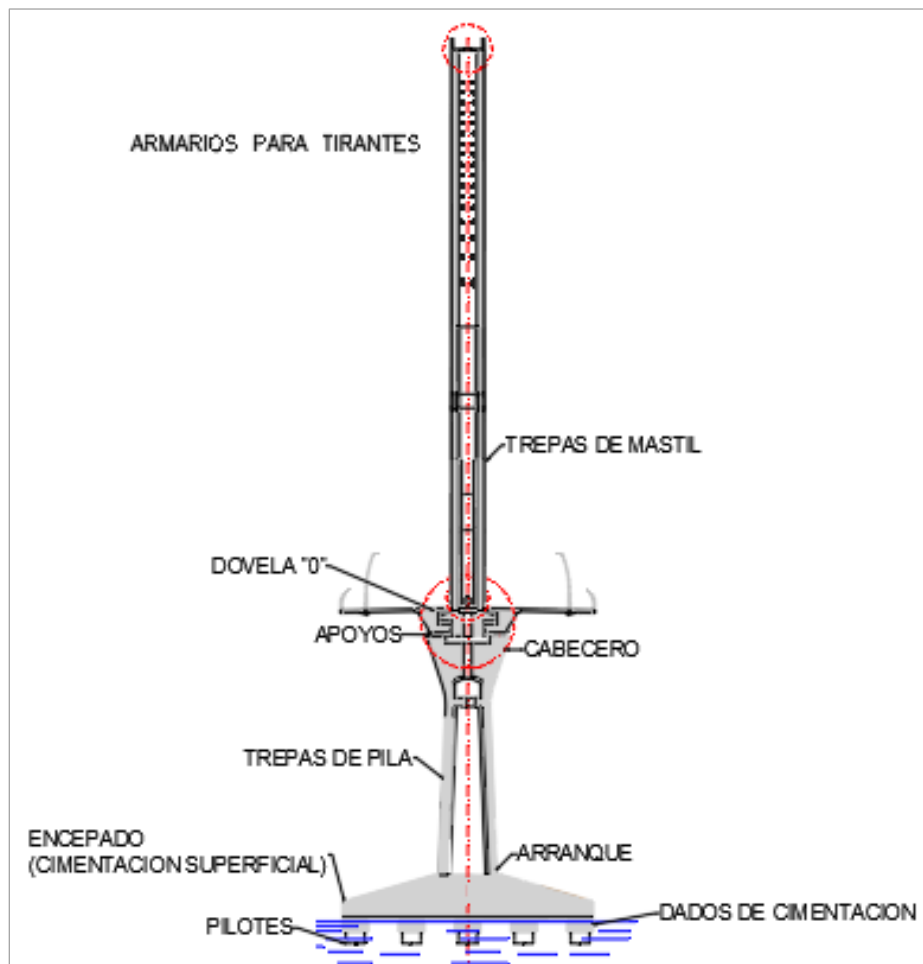


Figura 2. Vista en Planta ubicación general de las Pilas. **Fuente.** Consorcio SES.



### Generalidades del proyecto



**Figura 3.** Esquema general torres de atirantamiento. **Fuente.** Consorcio SES

Las torres de atirantamiento o **PILONOS** tienen una altura cercana a los 133.7m formados por una pila por debajo del tablero de 42m y un mástil a continuación de 89.2m de altura.

Los pilonos tienen una sección variable hexagonal hueca con paredes de 1.1m – 1.4m, que es maciza en la zona de arranque del mástil y de unión con el tablero. Las dimensiones del **ARRANQUE** son, en sentido transversal de 9.10m y en sentido longitudinal 6m, variando hasta

unas dimensiones mínimas de 7m y 6m a partir de la cual se ensancha en un **CABECERO** similar a la de las pilas de los viaductos de acceso donde se apoya el tablero. Los **MÁSTILES** de atirantamiento por encima del tablero tienen una altura de 89.2m y sección en sentido longitudinal al puente, con 4.9m y en sentido transversal con 6m.

El tablero tendrá apoyos esféricos con capacidad de antilevantamiento, propiedad que permitirá ciertos desplazamientos o rotaciones que tienen como principal aplicación la transmisión de cargas de un elemento a otro, en este caso entre los pilonos y la losa de la estructura. Esto se materializa con **DOVELAS “0”** con detalles especiales tanto para habilitar el hueco de paso del mástil, como con vainas para el paso de cables de presfuerzo de cosido y manguitos para la conexión de refuerzo.

La cimentación se realiza sobre un elemento estructural tipo zapata que permite recoger las cargas de los pilares de una estructura y transmitirlos a las cabezas o dados de un grupo de pilotes, consiguiendo que sean transmitidas adecuadamente al terreno, este elemento es llamado: **ENCEPADO** apoyado en 20 **PILOTES** de 2.8m de diámetro. El volumen de concreto en los encepados fue de 5547m<sup>3</sup> y 5607m<sup>3</sup> para las pilas 13 y 14 respectivamente.

## Capítulo 1.

### Aspectos Generales del Proyecto

#### 1.1. Planteamiento del problema.

Las megas estructuras en los últimos años a nivel mundial han revolucionado la ingeniería conceptual y de diseño, logrando aportar al crecimiento coyuntural, sostenible y de infraestructura de los países. En Colombia, el sector constructivo ha ido en aumento mediante el desarrollo de grandes proyectos viales y de infraestructura. En la visión de fortalecer la economía

nacional, aprovechando la posición geográfica entre el margen del mar Caribe y la desembocadura del río Magdalena (siendo este la vertiente fluvial más importante del país con una longitud de más de 1500 km), se encuentra la ciudad de Barranquilla, Distrito Especial Industrial y Portuario del Departamento del Atlántico, donde se ha venido ejecutando el proyecto del “Nuevo Puente Pumarejo”, desde el cual se espera convertir al río Magdalena en la arteria marítima y fluvial de grandes embarcaciones que se dirijan al interior del país.

Los puentes atirantados como el que se pretende entregar en el segundo semestre del 2019, consisten en un tablero soportado por cables inclinados (tirantes) fijados en los mástiles. Se han tornado más comunes debido a su economía y estabilidad para vanos grandes (200 a 1000 m) pero principalmente por la apariencia atractiva. (Quintana Ytza, 2009).

Las técnicas actuales de análisis, tecnología de los cables y procedimientos constructivos, ha permitido superar los 1000 m de luz, como es el caso de los puentes de **Stonecutters** en Hong Kong (1018 m), el puente de Suttong en China (1088m) y el puente de la isla de Russki en Rusia con 1104 m. (Sima & Knut, 2014). El nuevo Puente Pumarejo, se diseñó para alcanzar los 380m en su vano principal.

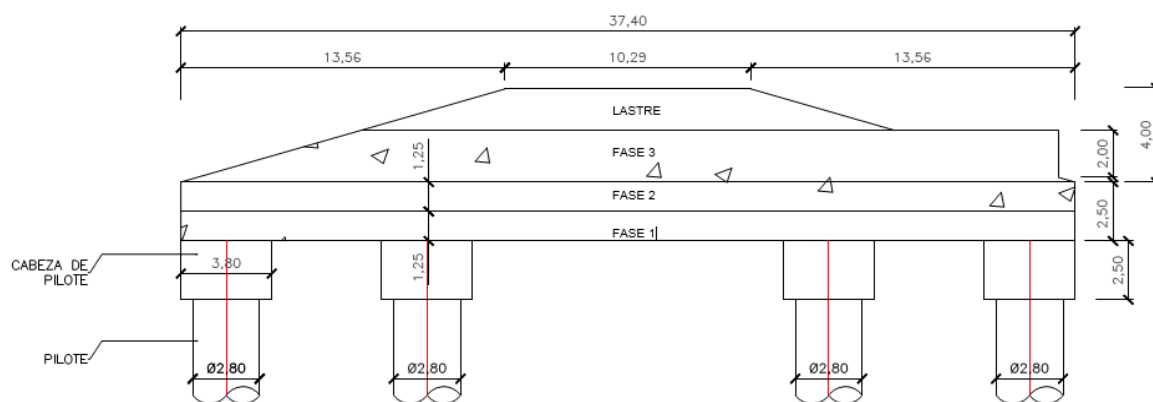
La tipología estructural va enlazada con múltiples factores como: material que se utilizará, la disponibilidad local, el costo, facilidad de transporte al lugar, número de trabajadores, controles de calidad, seguridad, durabilidad; también interesa conocer la luz, el tipo de tráfico al que está destinado, entre otros. Con base a lo anterior, un puente atirantado se diferencia de los puentes colgantes y de los arcos superiores, tanto en su estructura como en su forma. Por ejemplo:

- Longitudinalmente pueden tener dos torres y ser simétricos, o una sola torre desde donde se atiranta todo el vano principal.

- Pueden tener dos planos de atirantamiento situados en los bordes del tablero, o un solo plano situado en su eje.
- Pueden tener muchos tirantes muy próximos, o pocos tirantes muy separados.
- Pueden tener tirantes paralelos, radiales, o divergentes.
- Las torres se pueden iniciar en los cimientos, o se pueden iniciar a partir del tablero, de forma que el conjunto tablero – torres – tirantes se apoya sobre pilas convencionales.
- Las torres pueden tener diversas formas; pueden estar formadas por dos pilas, por una sola, pueden tener forma de A, forma de A prolongada verticalmente, etc.

Todas las variables anteriores le dan al puente atirantado una libertad que no tienen los puentes colgantes ni los arcos superiores, más determinados morfológicamente. Las mayores distinciones entre los grandes puentes colgantes se encuentran en las formas de las torres y actualmente también en el tablero; en los arcos superiores se encuentran en las dimensiones de los arcos y en la disposición de las péndolas, aunque caben también variantes; pero está formalmente más limitado que el de un puente atirantado. (Solet Salamero, 2012)

En el nuevo Puente Pumarejo, se manejan estructuras con dimensiones que, para garantizar el funcionamiento, soporte de las cargas y el relleno del concreto algunas de estas estructuras son hormigonadas en diferentes fases. Las estructuras gravitacionales, las cuales dependen para su estabilidad y seguridad de una integridad estructural, usualmente no pueden tolerar grietas en ciertos planos (orientación). El número de juntas (fases de hormigonado) debe ser mínimo de acuerdo con los requerimientos de diseño y construcción. El diseñador debe establecer un diseño de fuerzas consistentes con los requerimientos para el desempeño de la estructura, cargas de construcción, descimbrado y durabilidad. (Ramírez, El Concreto Masivo, 2008)



**Figura 4.** Fases de hormigonado, Pilas 13 y 14. Nuevo Puente Pumarejo. **Fuente:** Autor proyecto de grado. 2019.

Se plantean 3 fases de hormigonado con dos juntas entre sí. Cada fase tendrá las siguientes dimensiones:

- Fase 1: El peso propio del hormigonado de la fase 1m lo soporta el sistema de encofrado. Sus dimensiones son de  $37.4m \times 37.4m \times 1.25m$  dando un volumen teórico de  $1748m^3$ .
- Fase 2: El peso propio del hormigonado de la fase 2, lo soporta la losa hormigonada de la fase 1. Considerando que el concreto de  $F'c$  (28 días) =  $35MPa$  y  $F'c$  (14 días) =  $30MPa$ . Las dimensiones de esta fase de hormigonado son igual a las de la fase 1.
- Fase 3: El peso propio del hormigonado de la fase 3, lo soporta la losa de hormigonado en las fases 1 y 2. Considerando que el hormigón de  $F'c$  (28 días) =  $35MPa$ . El hormigonado de esta fase incluye un elemento adicional llamado *lastre* que es la base de los alzados de la pila; la fase 3 tiene un volumen de concreto de  $1855m^3$  sobre la fase 2 de  $F'c = 35MPa$  y otra de  $526.72m^3$  de  $F'c = 50MPa$  correspondiente al lastre de las pilas.

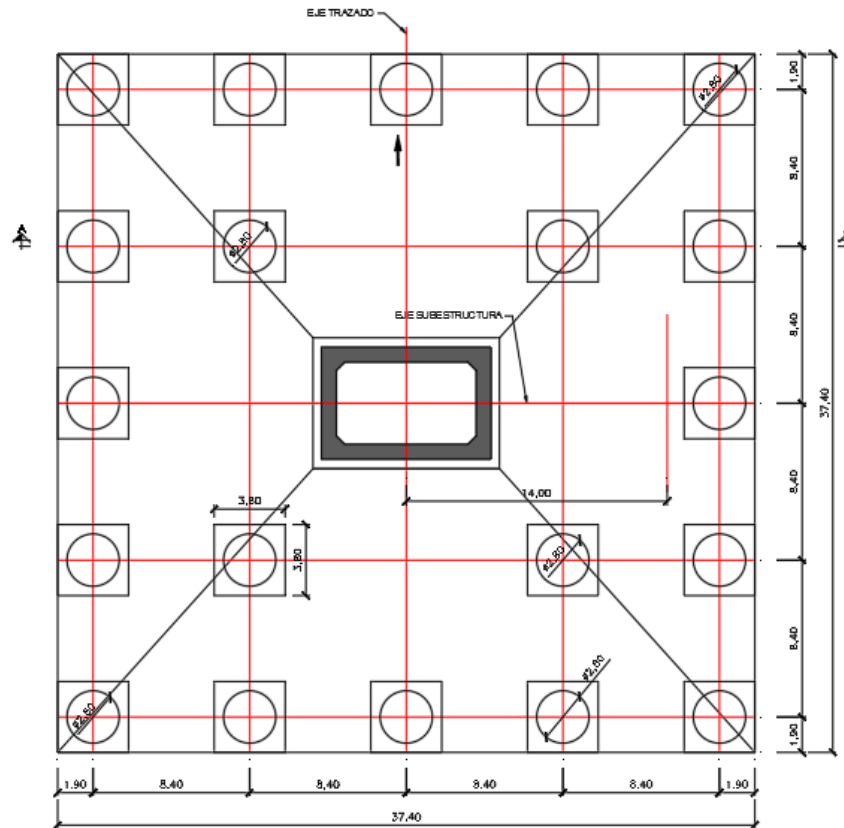
Por lo que se hace necesario, evaluar la temperatura de las estructuras masivas de concreto (cimentaciones superficiales) del “Nuevo Puente Pumarejo” como un aporte al buen

funcionamiento de las estructuras y minimizar daños en las mismas, por consiguiente, se debe determinar:

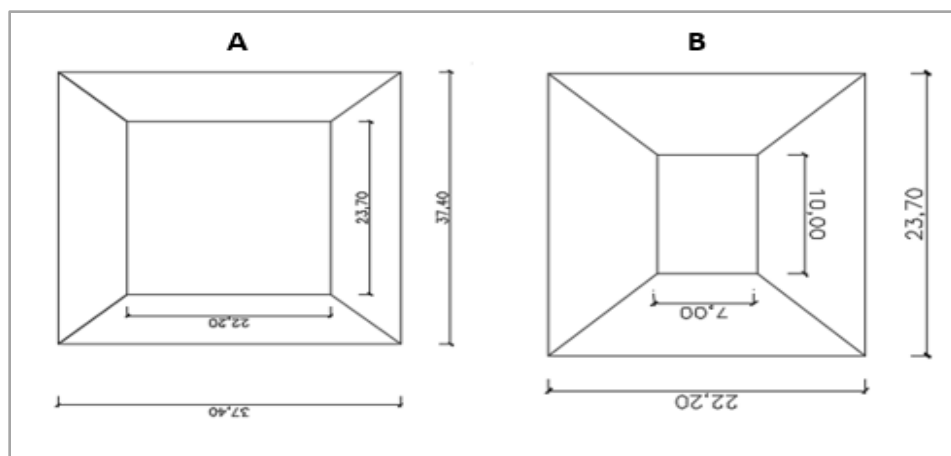
*¿Qué temperaturas se generan en las fases de hormigonado y el encepado de las pilas 13 y 14 del nuevo Puente Pumarejo?,*

*¿Cumplen con lo establecido en los párrafos 116, 207, 211, 305 de la norma ACI?;*

Con el fin de obtener información de soporte en la concepción de la construcción y el buen funcionamiento de las cimentaciones de las estructuras principales del nuevo Puente Pumarejo en las etapas de armado, desencofrado y puesta en funcionamiento, evitando fracturas tales como grietas y fisuras que pueden afectar la mega construcción.



**Figura 5.** Vista en planta Fase 1 y 2. **Fuente:** Autor proyecto de grado. 2019



**Figura 6.** (A) Dimensiones de la Fase 3; (B) Dimensiones del lastre. **Fuente:** Autor proyecto de grado. 2019.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Evaluar la termodinámica de los concretos masivos en las estructuras principales del nuevo Puente Pumarejo en la ciudad de Barranquilla

### **1.2.2. Objetivos Especificos**

- Determinar las temperaturas en cada fase de hormigonado de los encepados en las Pilas 13 y 14 del nuevo Puente Pumarejo.
- Establecer si los resultados obtenidos cumplen en lo concerniente a la norma ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE), parágrafos 116, 207, 211, 305, 301.
- Comparar el comportamiento térmico obtenido durante las diferentes fases de las estructuras estudiadas.

## **1.3. Justificación.**

Siendo el nuevo Puente Pumarejo es una de las obras insignias de Colombia, el rigor que debe cumplir con la normativa y de calidad es muy alto, por lo cual; el encontrar altas temperaturas en los encepados del tramo atirantado, se corre el riesgo de incumplir las normativas. Por tanto, hace que se deba evaluar las temperaturas de estos elementos masivos y asegurarse que cumplan dicha normativa.

El calor de hidratación es la energía que al liberarse genera un aumento en la temperatura debido a una reacción exotérmica, que se da una vez las partículas de cemento tienen contacto



con las de agua y los agregados para producir el concreto, la temperatura del elemento se eleva y posteriormente se disipa este calor por toda la estructura. Para el caso específico de los concretos masivos pertenecientes a este proyecto, el calor de hidratación es difícilmente disipado por ser un elemento de “dimensiones grandes”. No existe un tamaño de elemento específico de una estructura que al ser superado pueda clasificarse como concreto masivo. Muchos elementos estructurales de grandes dimensiones pueden no ser suficientemente masivos para que deba considerar el calor generado. Esto es crítico principalmente cuando las dimensiones mínimas de la sección transversal se acercan o superan 1 metro o cuando el contenido de cemento supera  $355\text{Kg/m}^3$ , según lo recomendado por el comité ACI 207, además que en la misma definición del ACI 116R *“El Concreto Masivo es cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes para requerir que se tomen las medidas necesarias para hacer frente a la generación de calor por hidratación del cemento y consecuente cambio de volumen, con el fin de minimizar el agrietamiento”* no se define en cuanto al espesor una dimensión específica.

(Ramírez, 2008)

La generación de temperaturas en el interior del elemento genera choques térmicos en la superficie, esto produce agrietamientos y fisuras en la estructura perjudicando los resultados necesarios para su correcto funcionamiento en cuanto a su durabilidad y acabado, lo mismo pasa cuando las diferencias entre la temperatura interna de las estructuras comparadas con la temperatura ambiente son muy grandes: se producirán fisuras en el elemento una vez curado. La experiencia y/o práctica indica que en algunos casos el hormigón puede presentar fisuras. Además, si se dan esfuerzos dinámicos que produzcan agotamiento en el hormigón y/o armaduras, las fisuras se propagaran. (Calavera, 2015). Es importante resaltar que las grietas y fisuras aparecen en el concreto como consecuencia de tensiones superiores a su capacidad

resistente. Las causas pueden ser de origen químico, atribuidas a cambios en la hidratación del cemento o por la oxidación del acero de refuerzo. También por origen físico como las expansiones y/o contracciones, generando en el hormigón esfuerzos de compresión y de tracción, respectivamente. (Toirac Corral, 2004)

Barrefa, Iaiani & Sota (2000), afirman que: *“las fisuras son generalmente causadas por cualquier contracción plástica o por secado. La contracción plástica ocurre antes de que el hormigón se endurezca; la contracción por secado ocurre después del endurecimiento del hormigón. Además, si las tensiones de tracción causadas por confinamiento exceden la resistencia a tracción del hormigón, el hormigón se fisura”*.

Basado en lo anterior, se expone la necesidad e importancia de realizar un seguimiento de la evolución de temperaturas en las estructuras masivas del proyecto, así como la determinación de las temperaturas máximas alcanzadas en estos elementos estructurales. De esta manera; es posible controlar la aparición de fisuras en futuros elementos evitando que se presente choques térmicos bruscos en el interior del elemento estructural, con el exterior (temperatura ambiente). La termodinámica muestra la evolución de la temperatura de un elemento cada cierto tiempo determinado, su punto más alto y compara a su vez con la temperatura ambiente para conocer de esta manera cuando es el momento adecuado de desencofrar y no tener fisuras en los elementos.

Las estructuras principales del nuevo Puente Pumarejo, las Pilas 13 y 14, se estima tendrán cimentaciones superficiales con un volumen aproximado de 6000 m<sup>3</sup> de concreto, por lo que es necesario evaluar en cada fase de hormigonado sus niveles térmicos en diferentes puntos de su extensión y de esta manera, garantizar que no se presentarían fisuras ni tener problemas una vez estas estructuras empiecen a soportar las cargas que estarán sobre las cimentaciones. Haciéndose necesario el desarrollo de este proyecto al evaluar las variaciones en las temperaturas

y comparar si cumplen con los criterios para su correcto funcionamiento establecido por la norma ACI.

## **Capítulo 2.**

### **Marco de referencia**

#### **2.1. Antecedentes**

Los puentes atirantados son una de las tipologías estructurales que más se han desarrollado en los últimos años, alcanzando luces que llegan actualmente a más de 1.000 m, como en el caso del Puente Stonecutters en Hong Kong; del Puente Sutong sobre el Yantgse en China y del Puente de la isla Russky en Rusia. De esta manera, esta tipología estructural está consiguiendo abarcar hoy en día un rango de luces que hasta hace menos de 20 años era exclusivo de los puentes colgantes. Estos avances han venido precedidos de un importante esfuerzo, desarrollado a nivel internacional por distintos investigadores, de cara a conseguir un mejor entendimiento y aprovechamiento de su comportamiento estructural, así como orientado a mejorar tanto los métodos de cálculo, como los procesos constructivos. (Carrillo Alonso & Astiz Suárez, 2015)

En la actualidad, la ciudad de Barranquilla es una de las ciudades más importantes de Colombia debido a su sostenido crecimiento económico, reflejado en el aumento en el número de obras civiles de gran relevancia que se construyen en la ciudad, como es el caso de la creación de un nuevo puente para unir los departamentos del Atlántico y del Magdalena. Esta mega-obra que transformará la infraestructura vial del Caribe colombiano, tiene una inversión por parte del Instituto Nacional de Vías - INVÍAS de \$735.951 millones de pesos colombianos, financiados

por parte de instituciones gubernamentales y privadas en la ciudad ha potencializado su crecimiento en infraestructura. (Pacheco Bustos et al, 2017)

El nuevo Puente Pumarejo que se construye en Barranquilla a partir del año 2015, unos metros aguas arriba del puente Laureano Gómez (construido en el año 1974), tiene una longitud de 2.173 metros entre estribos; tiene un tablero de 38,1 m de ancho que permite el desarrollo de doble calzada, cada una de tres carriles. Para efectos de la navegación mayor, permitirá el cruce del canal navegable por el brazo izquierdo de la isla Rondón, que es una continuación del canal de acceso del puerto de Barranquilla hasta puerto PIMSA (K38). El puente tiene un gálibo horizontal de 380 m entre los pilares o pilonas principales, y gálibo vertical de 45m. Cada pilar está soportado sobre una plataforma de 37,4 x 37,4 ms que quedará sobre la superficie del agua, la que a su vez está apoyada en 20 pilotes en concreto de 2,80m de diámetro y 55m de longitud.

El pilotaje de los pilares lado Barranquilla se inició el 15 de enero de 2016. Los pilares, lado Barranquilla están separados unos 70m de la margen izquierda del río, y con respecto al puente Laureano Gómez, está próxima a la pila principal izquierda que es la que limita el borde izquierdo del canal navegable. Con relación al terminal de la Sociedad Portuaria Regional Barranquilla, el muelle más próximo aguas arriba, es el de PORTMAGDALENA (K21,6), especializado en granel líquido. Está ubicado en la margen izquierda, aproximadamente 300m aguas abajo de la Pilona lado Barranquilla del puente Pumarejo, de ahí el interés de poder conocer los efectos de la cimentación del puente sobre el canal navegable, canal de acceso y zona de atraque del muelle de esta empresa. (Aguas Media et al, 2017)

Barranquilla es una ciudad que maneja temperaturas entre 27°C y 32°C, por lo que se le debe dar un cuidado especial a este tema del clima cálido al momento de los vaciados de concreto porque estas altas temperaturas tienden a evaporar el agua, afectando la relación

agua/cemento del concreto, lo que tiene implicaciones en la resistencia del elemento, aceleración de asentamiento y pérdida del manejo de la mezcla. Se define como clima cálido cualquier periodo en el que se experimente una elevada temperatura, independientemente del clima predominante del sitio de la construcción. En la literatura puede encontrarse rangos en la temperatura ideal del concreto alrededor de los 20°C. (Conrado & San José, 2016).

Realizar mediciones de temperatura garantizara que los elementos estructurales en una ciudad como Barranquilla, alcancen su resistencia diseñada y sea completamente funcional. Cuando la temperatura ambiente sea menor que 4°C o mayor que 35°C debe llevarse un registro de las temperaturas del concreto y de la proyección dada al concreto durante su colocación y curado. Las temperaturas superficiales e internas pueden ser determinadas colocando sensores de temperatura en contacto con las superficies de concreto o entre las superficies de concreto.

(NSR-10, 2010)

En el 2012, se hace una comprobación experimental de la influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón, mediante un ensayo a compresión de probetas de una misma mezcla de hormigón, pero sometidas a condiciones de humedad de curado distintas (100% y 50% de humedad) y diferentes dosificaciones. El análisis demostró que el curado tiene un efecto significativo en la resistencia a compresión del hormigón. Sin importar la relación agua/cemento, con un curado al 100% de humedad se consiguen aumentos en la resistencia a rotura del hormigón, frente a un curado al 50% de humedad. Los mayores incrementos fueron obtenidos para la mezcla con mayor relación de agua/cemento. (Garin et al, 2012)

En otro procedimiento experimental donde las variables a estudiar fueron trabajabilidad y la resistencia a compresión del concreto, estas se sometieron a diferentes condiciones climáticas de temperatura ambiental y humedad relativa. Se realizaron simulaciones térmicas ambientales

cíclicas condicionadas por los dos días históricamente extremos de Barcelona en función de un análisis histórico de temperaturas máximas (24 de agosto de 2000) que es la de verano de 38°C y mínimas (23 de diciembre de 2001) que es la de invierno de 6°C en base a los registros del Observatorio Fabra (Meteocat, 2006), mientras que para el caso de las temperaturas constantes, las cuales son las condiciones de referencia, se tomó una temperatura de 20°C (constante) y una humedad relativa de aproximadamente 95% (constante), además, dentro del rango de tiempos de saturación estudiados (30 minutos y 24 horas), las diferencias son poco significativas, lo que representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, lo que en términos prácticos, podría explicar la poca trabajabilidad y pérdida de trabajabilidad en el concreto bajo condiciones de alta temperatura. (Ortiz et al, 2007)

Un aumento de 10°C en la temperatura del hormigón tiene como consecuencia la disminución en el asentamiento inicial de aproximadamente 25 mm; de igual forma, por cada 10°C de aumento en la temperatura del hormigón, se necesitarán de 4 a 6 Kg/m<sup>3</sup> de agua para mantener un mismo asentamiento. (Juan, 2012)

La climatología del lugar es un factor que se tiene que considerar en los procesos de curado, el ACI (American Concrete Institute) distingue dos tipos diferentes de climas extremos que pueden provocar problemas durante el mezclado, transporte y colocación del concreto: el clima frío y el clima cálido. En el primer caso, los compuestos del cemento pueden no reaccionar con el agua o incluso congelarse. Mientras que, en el clima cálido, el agua del concreto puede evapora rápidamente y una parte significativa del cemento no alcance a hidratar, por lo tanto, no aportara resistencia al material y éste sea muy poroso.

Desde el enfoque anterior, se clasifico que las construcciones de la Península de Yucatán se enfrentan a las condiciones de manejo de concreto en clima cálido. El comité 305 del ACI

(1999) define el clima cálido como cualquier combinación de las siguientes condiciones: Alta temperatura ambiental, Alta temperatura del concreto, Baja humedad relativa, Velocidad de viento considerable y Radiación solar considerable. De acuerdo con la PCA (Portland Cement Association, 2000) es deseable una temperatura entre 10°C y 16°C para el concreto fresco; sin embargo, en clima cálido, en donde es necesario frecuentemente un enfriamiento artificial, suele especificarse un límite de hasta 32°C (Solis Carcaño & I. Moreno, 2005)

Entre las conclusiones, se destaca la temperatura de curado que al elevarse, dentro de los márgenes del estudio, aumentan las resistencias de los hormigones; sin embargo, se aprecia que, en general, los incrementos de resistencias son superiores con el paso de 5°C a 20°C que con el de esta temperatura a 35°C, hecho que, por otra parte, es lógico si se tiene en cuenta que las temperaturas comprendidas entre 15°C y 20°C son las que dan lugar a hidrataciones más idóneas. (Fernández Canovas, 1991)

## **2.2. Marco teórico**

En la infraestructura vial de un país, los puentes hacen parte en el desarrollo de una nación, siendo estos los que interconectan zonas aisladas o hacen parte de un conector para mejorar la circulación vial entre dos puntos. Por tanto, los objetivos de la ingeniería son asegurar su conservación y funcionamiento con seguridad (Muñoz & Gómez, 2013)

Los puentes como estructuras son construidos para salvar un cauce o extensión de agua, como quebradas, ríos, canales, lagos, bahías, etc. (Ruíz Guerrero, 2011). Aquellos puentes atirantados son estructuras ligeras, muy flexibles, con un marcado acoplamiento modal y que, además, presentan un amortiguamiento reducido. (Cámara & Astiz, 2014).

En puentes atirantados, la resultante de los tirantes delanteros y traseros se compensa, dando lugar a una resultante que debe coincidir con el eje de la torre. Otra condición de los

puentes atirantados es que las componentes verticales de las fuerzas de los tirantes se equilibren en lo posible con las cargas del tablero, para reducir al mínimo las flexiones en él. Esta es la razón de ser del puente atirantado. Pero este equilibrio no se consigue si los vanos del puente son desiguales porque uno pesa más que el otro. Para conseguir el equilibrio la única posibilidad es que el peso de los vanos sea diferente, haciendo más ligero el grande y más pesado el pequeño. (Fernández Troyano et al, 2016)

Las estructuras de concreto reforzado bajo condiciones ambientales específicas brindan un excelente servicio; en concretos provenientes de buenos procesos de fabricación y de buena calidad, el riesgo de corrosión es mínimo y normalmente estos proveen una aceptable protección química y física para los aceros embebidos (Pradhan et al., 2009; Melchers et al., 2006; Almusallam et al., 2011).

La resistencia a la compresión del concreto es una propiedad compleja que depende, no solamente de su composición intrínseca (diseño de la mezcla) y su elaboración, sino también varía con su edad y la temperatura a la cual se somete durante el fraguado, curado y endurecimiento. La madurez indica la velocidad de hidratación del cemento o cementantes presente en una mezcla de concreto, es decir, es el proceso exotérmico al cual se ve sometido el cemento contenido dentro del concreto durante el proceso de fraguado. (Quimbaua Herrera, 2009).

La mezcla, del agua con el cemento, produce calor de hidratación), se eleva la temperatura del elemento fabricado y si el elemento no tiene la capacidad de disipar ese calor, por tratarse de una estructura de dimensiones “grandes”, puede cambiar su volumen provocando tensiones y por consecuencia agrietamientos que dañan las características deseadas en el



concepto. También el diferencial de temperatura entre el interior del elemento y su superficie exterior es motivo de agrietamientos. (Ramírez, 2008),

Las celdas estructuradas, parecidas a los caissons (utilizados para cimentar en suelos difíciles) con un procedimiento constructivo simple son muy frecuentes al tener estructuras con dimensiones grandes. Una celda estructurada de cimentación está compuesta por muros perimetrales e intermedios, estos últimos se requieren cuando las dimensiones en planta de la cimentación son grandes ( $> 6$  m), estructuralmente ligados a una losa tapa; y la losa de fondo no existe. (Martínez Galván & Romo Organista, 2013)

### **2.2.1 Dimensiones estructurales.**

Cuando la dimensión más pequeña de un elemento de concreto no es muy grande, la evolución del calor en la mezcla es baja y el calor de hidratación puede ser disipado con facilidad por las dos superficies, (la cimbra no aísla) la máxima temperatura no será muy elevada. Sin embargo, en todo caso la elevación de temperatura es necesaria con el fin de crear un gradiente (diferencia) de temperatura para conducir el calor a la superficie.

Por ejemplo; Una losa de cimentación puede ser considerada como un muro de gran dimensión con una cara expuesta por lo que la pérdida de calor se dará solo por la superficie expuesta. Si bien la máxima temperatura ocurre a edades tardías del concreto y sobre una gran parte del concreto, deberá existir un balance de las fuerzas estáticas de compresión y tensión, los esfuerzos en la parte central son pequeños y esencialmente uniformes, mientras que en el lado expuesto los esfuerzos a tensión son muy altos. A pesar de esto no se desarrollaran deformaciones si el volumen o longitud cambian asociados con el decrecimiento de la temperatura del concreto en masa o el elemento puede acomodarse libremente. (Merritt, 1993)

### **2.2.2 Agregados.**

Para la producción y suministro, los agregados son transportados desde los bancos localizados previamente hasta la trituradora, para la selección de tamaños, son tamizados por diferentes mallas, luego se almacenan en montones donde se lavan y posteriormente se enfrían si es necesario para la elaboración de mezclas. Cuando se transporta agregados de gran tamaño desde bandas elevadas, se reduce al mínimo las fracturas, utilizando una conducción de escalera.

El agregado se almacena separándolo en diferentes tamaños. Sin embargo, cuando es necesario almacenar en montones, el uso de métodos incorrectos acentúa problemas con los finos y también causa segregación, rompiendo el agregado, y una excesiva variación en la graduación. Los montones deben construirse en capas horizontales o suavemente inclinadas. Debe tenerse una base dura provista de un buen drenaje para evitar la contaminación del material en el fondo, y el mezclado de los diferentes tamaños debe evitarse mediante muros apropiados o amplios espacios entre los montones. (Ramírez, 2008)

### **2.2.3 Concreto.**

El concreto es uno de los principales materiales usados en la construcción, tiene elevada disponibilidad y permite flexibilidad en el diseño. Por otro lado, es durable y no requiere de materiales caros para su producción. El cemento es la excepción y tiene elevado precio, fundamentalmente a causa de la elevada cantidad de energía empleada en su fabricación. (Borrajo Pérez et al, 2012).

Así mismo, es un material compuesto por una fase de productos sólidos de hidratación de cemento y otra fase de partículas pétreas. Los agentes del medio ambiente, que generalmente

ocasionan la falta de durabilidad del concreto, requieren que el material sea permeable para poder penetrar a través de la masa del material; estos agentes, además, son auxiliados para su transporte interno por difusión, debida a los gradientes internos de humedad y temperatura, o por ósmosis. (Solis Carcaño & Moreno, 2006).

#### **2.2.4 Concreto estructural.**

El concreto estructural presenta un comportamiento razonablemente bueno cuando se expone a altas temperaturas, bien de forma continuada en determinados procesos industriales o bien de forma extraordinaria en situación de incendio. A pesar de ello, la exposición a temperaturas elevadas produce una degradación fisicoquímica que reduce las propiedades resistentes del hormigón. Uno de los principales problemas del hormigón sometido a altas temperaturas es el desconchamiento superficial (sloughing off) o la rotura explosiva (explosive spalling) del mismo, fenómenos a los que son especialmente sensibles los hormigones de alta resistencia – HAR debido a su microestructura más compacta frente a los hormigones de resistencia convencional (HC). Estos tipos de fallo se deben a la incompatibilidad de deformaciones por dilatación diferencial y al aumento de presión intersticial por los gases generados en distintas reacciones de descomposición, como ocurre en los hormigones de áridos calizos cuando se produce la des-carbonatación de la caliza. (Varona et al, 2017)

#### **2.2.5 Durabilidad.**

La durabilidad del concreto está definida como la capacidad que tiene éste para resistir las acciones del entorno, medio ambiente que lo rodea, que le pueda generar cualquier proceso de deterioro. La durabilidad de cualquier estructura de concreto depende de diversos factores, tales como el diseño y cálculo de la estructura, los materiales empleados, las prácticas constructivas

(mano de obra calificada) y los procesos de protección y curado, que se desarrollan en las diferentes etapas o procesos de consecución del proyecto. Dichos factores generan unas condiciones iniciales de resistencia frente a las solicitaciones de servicio y establecen algunas características del concreto en el nivel externo y en el interno, textura superficial, estructura y microestructura o poros en el interior de la masa de concreto. Al ser rebasada, la capacidad de resistencia se generan sobreesfuerzos en la estructura que, a su vez, producen microfisuras y/o macrofisuras, que en conjunto con los poros, de acuerdo con su tipo, tamaño y distribución, crean un puente entre el ambiente que rodea al concreto y la estructura interna del mismo, estableciendo caminos ideales para los mecanismos de transporte de fluidos que en interacción con el clima (temperatura, presión, humedad) ocasionarán el inicio y/o propagación de deterioro del concreto por acciones físicas, químicas y/o biológicas o del refuerzo (corrosión), que afecta el comportamiento de la estructura de concreto en aspectos importantes como resistencia, rigidez y permeabilidad del mismo. (Páez Moreno et al, 2009).

#### **2.2.6 Generación de calor.**

Las opciones que se tienen para buscar limitar la generación de calor incluyen el uso del cemento con la característica especial de bajo calor de hidratación, uso de cementos hidráulicos y reducción del contenido de cemento como uso de material puzolánico como ceniza volante o puzolana natural, para lograr una reducción máxima de la producción de temperatura sin sacrificar el desarrollo de resistencia a largo plazo. En algunos casos, como el nuevo Puente Pumarejo, se tomó ventaja de la reducción del cemento aprovechando la disminución del agua de mezclado y reemplazo por hielo. Estas opciones, pueden ser relacionadas para minimizar el calor

generado. Sin embargo, la baja en la producción de calor, se contrapone con una lenta ganancia de resistencia, lo que requiere una edad mayor de diseño. (López, 2003).

### **2.2.7 Temperatura.**

En situaciones de altas temperaturas, el concreto sufre una pérdida gradual en la resistencia según el nivel de temperatura, tiempo de exposición a altas temperaturas, gradiente térmico y velocidad de calentamiento. (Bamonte & Gambarova, 2010).

Las altas temperaturas, alta velocidad del viento y baja humedad relativa, pueden afectar al concreto fresco de dos formas importantes:

- Elevado ritmo de evaporación puede inducir a una temprana fisuración por retracción plástica o retracción por secado y también elimina el agua de la superficie necesaria para la hidratación a menos que se empleen métodos apropiados de curado.
- El agrietamiento por temperatura puede producirse por una caída rápida de la temperatura del concreto, tal es el caso de las paredes o losas de concreto 35 que son vaciados en un día cálido, seguido de una noche fría. Una alta temperatura acelera también la hidratación del cemento y contribuye a un potencial agrietamiento térmico en estructuras masivas de concreto. (Palomino, 2014).

El límite máximo de temperatura, para clima cálido, del concreto fresco permitido es de 35°C, a menos que las especificaciones indiquen lo contrario, o que el arquitecto/ingeniero según su experiencia en campo o proconstrucción, acepte una temperatura más alta que la recomendada. (ACI, 2007).

La temperatura juega un papel muy importante en la calidad del concreto, normalmente bajo condiciones de clima cálido, se requiere una mayor cantidad de agua para una determinada

consistencia o asentamiento, dado que *“el hormigón es una mezcla en proporciones adecuadas de: áridos, cemento, aditivos y agua. El contacto del agua con el cemento provoca una reacción de hidratación la cual genera endurecimiento de la mezcla”*. (Garin et al, 2012)

El efecto de la temperatura en la demanda de agua es principalmente producido en la velocidad de la hidratación del cemento y también en la tasa de evaporación del agua (Ortiz Lozano et al, 2007). Lo anterior, también reduce los tiempos de fraguado y desde el punto de vista mecánico, reduce la resistencia. (Ortiz et al, 2008).

Por otro lado, deberá tenerse en cuenta que cuando la temperatura del concreto es baja, la hidratación avanza a una velocidad mucho menor. Las temperaturas inferiores a los 10°C son desfavorables para el desarrollo de la resistencia a edad temprana; debajo de los 4.5°C, el desarrollo de la resistencia a edad temprana se retrasa en gran medida; y a temperaturas de congelación o por debajo de ellas, hasta los -10°C, el desarrollo de resistencia es mínimo o nulo.

### **2.2.8 Concretos masivos.**

La ACI 207.1, habla de que cualquier volumen de concreto con dimensiones lo suficientemente grandes como para que se tomen medidas que controlen la generación de calor de la hidratación del cemento y su cambio en volumen para minimizar su agrietamiento. Algunos elementos estructurales grandes pueden ser suficientemente masivos para que la generación de calor deba ser considerada, particularmente cuando la dimensión mínima de la sección transversal del elemento solido se aproxima o exceda de 60 a 90 cm o cuando el contenido de cemento exceda de 455 kg/m<sup>3</sup>. (ACI 211).

Según el Departamento de Transportación de Florida, un elemento debe ser considerado como masivo si presenta las siguientes condiciones:

- La dimensión mínima es de un metro (1 m)
- La relación de volumen a superficie es mayor de 0.30.

Tabla 1.

*Temperaturas máximas de colocación de concreto.*

“La temperatura de las diferentes mezclas de concreto no debe exceder de los valores mostrados en la siguiente tabla:

Tipo de concreto	Espesor del elemento por colar cm	Temperatura máxima en planta °C	Temperatura máxima de colocación °C
Masivo	>100	20	23
Semimasivo	60-100	24	27
Normal	<60	28	31

*Fuente:* Departamento de Transportación de Florida.

## 2.3. Marco legal

El reglamento para concreto estructural corresponde a la norma de American Concrete Institute - ACI 318S-05, donde se proporciona los requerimientos mínimos para el diseño y construcción de elementos de concreto estructural de cualquier estructura.

### 2.3.1 Guía de hormigón en masa /aci 207.1r.

#### 2.3.1.1 Cementos.

ACI 207.2R y 207.4R indica los tipos de cemento y los efectos en la generación de calor. Los siguientes tipos de cemento hidráulico son adecuados para su uso en la construcción de hormigón en masa:

- Cemento Portland - Tipos I, II, IV y V, como está cubierto por ASTM C 150;
- Cemento mezclado - Tipos P, IP, S, IS, I (PM) e I (SM), según lo cubierto por ASTM C 595.
- Cemento hidráulico: tipos GU, MS, HS, MH y LH, cubiertos por ASTM C 1157.

Los cementos Tipo I y GU son adecuados para su uso en la construcción general. No se recomienda su uso solo en hormigón en masa sin otras medidas que ayuden a controlar los problemas de temperatura debido a su calor de hidratación sustancialmente mayor. Su uso incluye pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otras aplicaciones.

Los cementos tipo II (calor moderado) y MH son adecuados para la construcción en masa de concreto porque tienen un calor moderado de hidratación, lo cual es importante para el control de las grietas. Los cementos de Tipo II y MS están diseñados para una resistencia moderada al sulfato y no tienen propiedades de calor moderadas.

Los tipos IV y LH, cementos de bajo calor, pueden usarse donde se desee producir un desarrollo de calor bajo en estructuras masivas. Ellos no se han utilizado en los últimos años debido a que han sido difíciles. El tipo IV el calor de hidratación puede ser limitado a 60 cal/g (250 kJ / kg) a los 7 días y 70 cal/g (290 kJ / kg) a los 28 días.

Los tipos HE, proporcionan alta resistencia a edades tempranas, usualmente menos de una semana. Este cemento se usa de la misma manera que el portland tipo III.

El cemento tipo HS es el cemento utilizado cuando el concreto estará expuesto a la acción severa de sulfatos principalmente donde el suelo o el agua subterránea tienen altas concentraciones de sulfatos, este cemento se utiliza de la misma manera que el portland tipo V.



El tipo LH, es el cemento utilizado donde la tasa y cantidad del calor generado por la hidratación deben ser minimizadas. Este cemento desarrolla resistencia en una tasa mas lenta que los otros cementos. Se aplica en estructuras de concreto masivo donde se debe minimizar el aumento de la temperatura resultante del calor generado durante el endurecimiento. Se usa de la misma manera que el cemento portland tipo IV.

Tabla 2.

*Equivalencia de tipos de cemento.*

Especificación del cemento	Aplicaciones*						
	Uso general	Moderado calor de hidratación	Alta resistencia inicial	Bajo calor de hidratación	Moderada resistencia a los sulfatos	Alta resistencia a los sulfatos	Resistencia a la reacción álcali-silice (RAS)**
ASTM C 150 (AASHTO M 85) cementos portland	I	II (opción de moderado calor)	III	IV	II	V	Opción de bajo álcalis
ASTM C 595 (AASHTO M 240) Cementos hidráulicos mezclados	IS IP I(PM) I(SM) S, P	IS(MH) IP(MH) I(PM)(MH) I(SM)(MH)		P(LH)	IS(MS) IP(MS) P(MS) I(PM)(MS) I(SM)(MS)		Opción de baja reactividad
ASTM C 1157 Cementos hidráulicos***	GU	MH	HE	LH	MS	HS	Opción R

**Fuente:** Cementos Holcim

Tabla 3.

*Requisitos de desempeño del cemento, valores típicos.*

Requisitos físicos normalizados	Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
	Finura	INEN 196	A	A	A	A	A	A
	Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	Tiempo de fraguado, método de Vicat	INEN 158						
	Inicial, no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
	Inicial, no menos de, minutos		420	420	420	420	420	420
	Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	C	C	C	C	C	C
	Resistencia a la compresión, MPA, mínimo	INEN 488						
	1 día		--	12	--	--	--	--
	3 días		13	24	11	11	5	--
	7 días		10	--	18	18	11	11
	28 días		28	--	--	25	--	21
	Calor de hidratación	INEN 199						
	7 días, (kJ/kg), máximo		--	--	--	--	290 (70)	250 (60)
	28 días, (kJ/kg), máximo		--	--	--	--	--	290 (70)
	Expansión en barra de mortero	INEN 2 529						
	14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
	Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos)	INEN 2 503						
	6 meses, % máximo		--	--	0,10	0,05	--	--
	1 año, % máximo		--	--	--	0,10	--	--

Requisitos opcionales	Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
	Opción R. Baja reactividad con áridos reactivos álcali - sílice. Expansión a:	INEN 867						
	14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
	56 días, % máximo		0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
	Falso fraguado, penetración final, % mínimo	INEN 875	50	50	50	50	50	50
	Resistencia a la compresión	INEN 488						
	28 días, MPa, mínimo		--	--	28,0	--	22,0	--

*Fuente:* cementos HOLCIM

### 2.3.1.2 Aditivos Químicos.

Los aditivos químicos pueden proporcionar beneficios importantes al hormigón en masa en su estado plástico como: aumento de la trabajabilidad, reducción del contenido de agua o ambos. Además, las mezclas químicas pueden usarse para retrasar el ajuste inicial, modificar la velocidad, reducir la segregación y reducir la tasa de pérdida de asentamiento. También, disminuye la evolución del calor durante el endurecimiento, aumenta la resistencia y la durabilidad, baja la permeabilidad y mejora la resistencia a la abrasión o a la erosión. Una cobertura completa de mezclas está contenida en ACI 212.3R. Los aditivos químicos que son importantes para el hormigón en masa se clasifican como atrapanes de aire, reductores de agua o controladores de fraguado.

- Los ***aditivos atrapanes de aire*** son materiales que producen diminutas burbujas de aire en el concreto durante la mezcla, con una trabajabilidad mejorada resultante, una segregación reducida, un menor sangrado, una menor permeabilidad y una mayor resistencia al daño de los ciclos de congelación y descongelación.
- Los ***aditivos reductores de agua y control de fraguado*** generalmente consisten en uno o más de los siguientes: ácido lignosulfonato, ácidos carboxílicos hidroxilados, carbohidratos poliméricos y tipos de naftaleno o melamina de reductores de agua de alto rango. Puntualmente, los aditivos reductores de agua se utilizan para reducir el agua de mezcla para aumentar la resistencia y trabajabilidad del hormigón, reducir la contracción del hormigón o producir la misma fuerza con menos cemento. Mientras que, los aditivos de control de fraguado se pueden usar para mantener el plástico de hormigón durante más tiempo en bloques macizos, de manera que se puedan colocar capas sucesivas y vibrar antes de que se fije la capa inferior.

### **2.3.1.3 Control de Temperatura.**

Los cuatro elementos de un programa de control de temperatura efectivo, cualquiera o todos los cuales se pueden usar para un proyecto concreto en masa, son:

- a. Control de contenido de materiales cementosos, donde la elección del tipo y la cantidad de materiales cementantes puede disminuir el potencial de generación de calor del hormigón.
- b. Preenfriamiento, donde el enfriamiento de los ingredientes logra una bajar la temperatura del concreto según se coloca en la estructura.
- c. Enfriamiento posterior, donde eliminar el calor del hormigón con serpentines de enfriamiento integrados limita el aumento de temperatura en la estructura.
- d. Gestión de la construcción, donde se realizan esfuerzos para proteger la estructura de diferenciales de temperatura excesivos mediante el conocimiento del manejo del hormigón, la programación de la construcción y los procedimientos de construcción.
- e. El control de temperatura para una estructura pequeña no puede ser más que una sola medida. En el otro extremo, proyectos grandes pueden justificar una amplia variedad de medidas de control separadas, pero complementarias, que pueden incluir la selección prudente de un sistema de cemento de baja generación de calor que incluya:
  - f. El uso de puzolanas.
  - g. El control cuidadoso de la producción de agregados graduados y el uso de agregados de gran tamaño en mezclas eficientes con bajo contenido de cemento.
  - h. El enfriamiento previo de los agregados y el agua de mezcla (o el procesamiento por lotes de hielo en lugar de agua de mezcla) para hacer posible una temperatura de hormigón bajo como colocado.

- i. El uso de aire de arrastre y otros químicos aditivos para mejorar tanto la frescas y propiedades endurecidos del hormigón.
- j. El uso de dimensiones de bloque apropiadas para la colocación.
- k. Coordinación de los horarios de construcción con los cambios estacionales para establecer alturas de elevación y colocación de frecuencias.
- l. Uso de equipos especiales de mezcla y colocación para disponer rápidamente el concreto enfriado con una absorción mínima de calor ambiental.
- m. El enfriamiento por evaporación de las superficies a través del curado con agua;
- n. Disipación de calor del concreto endurecido haciendo circular agua fría a través de tuberías embebidas.
- o. El aislamiento de las superficies para minimizar térmicas diferenciales entre el interior y el exterior del hormigón.

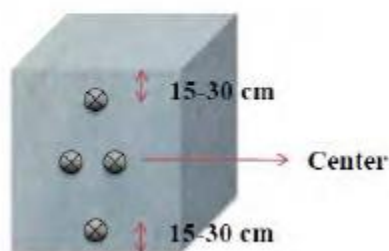
#### **2.3.1.4 Propiedades Térmicas.**

La característica más importante del hormigón en masa que diferencia su comportamiento del hormigón estructural es su comportamiento térmico. El conjunto de grandes dimensiones de las estructuras de concreto en masa crea el potencial para diferencias de temperatura entre el interior y la superficie de la estructura. Los diferenciales de cambio de volumen que se acompañan, a lo largo con moderación, resultan en tracción cepas y tensiones que pueden causar grietas que es perjudicial para la estructura. Las propiedades térmicas que influyen en este comportamiento del concreto en masa son calor específico, conductividad y difusividad. Sin embargo, el factor primario que afecta las propiedades térmicas de un concreto es la composición mineralógica del agregado. (Rhodes, 1978)

### 2.3.1.5 Calefacción y Control de temperatura.

Actualmente, es común preenfriar concreto en masa antes de la colocación. El simple recurso de usar hielo finamente astillado en lugar de mezclar agua y sombrear el agregado húmedo (pero no húmedo) reducirá la temperatura de colocación del concreto a un valor aproximado de 50°F (10°C) en clima moderadamente cálido. Para permitir el uso máximo de hielo en lugar de mezclar agua, el agregado fino debe drenarse a un contenido de agua de no más del 5%. Los agregados pueden enfriarse por evaporación a través de vacío, inundación en agua fría, circulación de aire frío (ACI 207.4R, ACI 305R) o nitrógeno líquido. Durante el período de curado para evitar el calentamiento y eliminar el calor del hormigón endurecido, se puede implementar el uso de formas de acero, sombreado y curado con agua. Incrustado de tubería de refrigeración para controlar el aumento de la temperatura en el hormigón, preenfriamiento del hormigón, aislamiento, protección a la alta temperatura ambiente, estas y más consideraciones y recomendaciones post-enfriamiento se proporcionan en ACI 207.4R.

- Use of **Thermocouples** to monitor temperature development linked to the rear panel of the digital thermometer



**Figura 7.** Ubicación recomendada para posicionamiento de control térmico. **Fuente:** ACI 207.4

### **2.3.1.6 Instrumentación.**

Los datos se recopilan, transmiten, procesan, revisan y accionan procedimientos de oportuna evaluación para la seguridad de una estructura. Para obtener credibilidad, se deben instalar suficientes instrumentos para proporcionar la confirmación de todos los datos importantes. Es deseable utilizar más de un tipo de para facilitar el análisis.

La instrumentación también es necesaria en casos donde se requiere correlacionar o confirmar un concepto de diseño inusual relacionado con la estructura o la condición del servicio, o donde los resultados pueden conducir a mayores refinamientos para el diseño futuro. Los factores o cantidades que a menudo se controlan en las estructuras masivas incluyen desplazamientos estructurales, deformaciones, asentamientos, filtraciones, niveles piezométricos en la cimentación y presiones de levantamiento dentro de la estructura.

## **2.3.2 Efectos térmicos y cambio de volumen en el agrietamiento del concreto en masa aci 207 2r.**

### **2.3.2.1 Comportamiento térmico.**

Las tensiones térmicas se desarrollan por un cambio de volumen del concreto en masa, las dos causas principales de dicho cambio de volumen son la generación y disipación del calor del cemento de hidratación y de los ciclos periódicos de la temperatura ambiente. En consecuencia, las medidas para reducir los cambios masivos de volumen de concreto incluyen la reducción del calor generado por la hidratación del cemento y la reducción de la temperatura de colocación inicial de la mezcla. La **ACI 207. 4R** describe métodos para reducir la temperatura inicial del concreto y los beneficios de colocar concreto frío.

### **2.3.2.2 Gradientes térmicos.**

Los cambios de temperatura a lo largo de una ruta particular o a través de una sección de una estructura se llaman gradientes térmicos. Los gradientes térmicos se determinan estableciendo el historial de tiempo de la temperatura para una ruta específica a través de una estructura. Los gradientes térmicos se clasifican como gradientes de masa o gradientes de superficie. El *gradiente de masa* es la temperatura diferencial entre la masa de hormigón y la base de contención, la temperatura interna máxima a largo plazo cambia en el concreto y se enfría internamente a una temperatura estable, igual o próxima a la del promedio anual.

Los gradientes de superficie son el resultado del enfriamiento del concreto de la superficie en relación con la temperatura interna más estable. A medida que esta "piel" de la superficie se contrae con el enfriamiento, se crea tensión en el concreto que da como resultado el agrietamiento. En este caso, el interior se convierte en la superficie de contención contra la que reacciona el hormigón de superficie. El agrietamiento superficial se suele limitar a profundidades superficiales; sin embargo, pueden desarrollarse condiciones en las que el agrietamiento superficial penetra profundamente en la estructura y, cuando se combina con cambios en el volumen del gradiente de masa u otras condiciones de carga, pueden agravar las condiciones de agrietamiento.

### **2.3.2.3 Resistencia a la tracción.**

La resistencia a la tracción del hormigón se verá afectada por el tipo y propiedades de agregados usados. Un concreto hecho de agregado grueso aplastado resistirá una mayor caída de temperatura sin agrietamiento en comparación del concreto hecho de agregado grueso



redondeado. Sin embargo, para una resistencia a la compresión dada, el tipo de agregado no afecta apreciablemente la resistencia a la tensión.

La edad a la que el hormigón alcanza su resistencia a la compresión afecta la relación de resistencia a la tracción y la compresión de manera que cuanto mayor es el hormigón, mayor es la resistencia a la tracción para una determinada compresión o fuerza. La resistencia del concreto que controla el cambio de volumen crítico puede ocurrir durante los primeros 7 días posteriores a la colocación o después de un período de 3 a 6 meses, dependiendo ante todo sobre pico temperaturas. Si el potencial de craqueo ocurre al inicio del enfriamiento excede el potencial de craqueo que puede ocurrir durante temperatura estacional y entonces el cambio crítico de volumen ocurrirá durante la primera semana.

#### **2.3.2.4 Propiedades térmicas del hormigón.**

Las propiedades térmicas del hormigón son coeficientes de expansión, conductividad, calor específico y difusividad. La relación de difusividad, conductividad y calor específico está definida por (ASTM 2006). En las expresiones anteriores, es más apropiado utilizar la resistencia a la compresión probable en el agrietamiento crítico en lugar del diseño de fuerza.

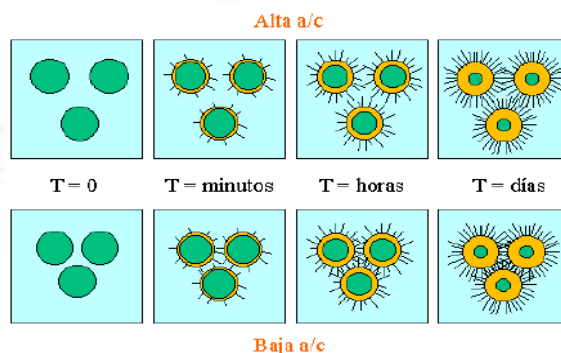
#### **2.3.2.5 Contenido de humedad y contracción por secado.**

Para consideraciones de tensión de tracción, el cambio de volumen resultante de la contracción por secado es similar al cambio de volumen de la temperatura, excepto que la pérdida de humedad del concreto endurecido es extremadamente lenta en comparación con la pérdida de calor. Por lo tanto, la contracción por secado depende de la longitud de la trayectoria de migración de humedad y, a menudo, afecta el concreto cerca de una superficie. Cuando la

longitud de la migración de humedad o el volumen del elemento sobre la superficie expuesta ( $V/S$ ) es pequeño, la contracción por secado aumenta las tensiones inducidas por la restricción externa y debe considerarse en el diseño del refuerzo.

Cuando el  $V/S$  es grande, la restricción a la contracción por secado es completamente interna, y el resultado es una tensión en la superficie o un patrón extenso de grietas superficiales que se extienden solo una corta distancia en el concreto. Cuando ocurren grietas superficiales de esta naturaleza, son pequeñas y el refuerzo no es particularmente efectivo para alterar el tamaño.

#### HIDRATACION DEL CEMENTO:



**Figura 8.** Hidratación del cemento. **Fuente:** Bamonte, P., & Gambarova, P. (2010). Properties of Concrete.

#### 2.3.2.6 Temperatura ambiente.

Las consideraciones de temperatura más importantes son las temperaturas promedio del aire durante e inmediatamente después de la colocación del concreto, y la temperatura mínima promedio en el concreto que puede limitar la temperatura inicial de colocación del concreto a un máximo de 24 y 38°C (75 a 100°F), dependiendo de las condiciones de colocación. La temperatura del concreto colocado durante el clima caliente puede exceder la temperatura media diaria del aire de un mínimo de 3 a 6°C (5 a 10°F) a menos que se tomen medidas para enfriar el concreto o el agregado grueso. Se deben hacer correcciones para la diferencia en la temperatura

del aire y la temperatura (ACI 305.1 – 06) de colocación usando la Grafico 1. Por ejemplo, si durante las primeras 24 horas la temperatura ambiente es de 27°C (80°F) y la temperatura del concreto, cuando se coloca, es de 16°C (60°F), una sección de concreto con una V / S de 2 pies (0.6 m) absorbería el 60% de la diferencia, o 7°C (12°F).

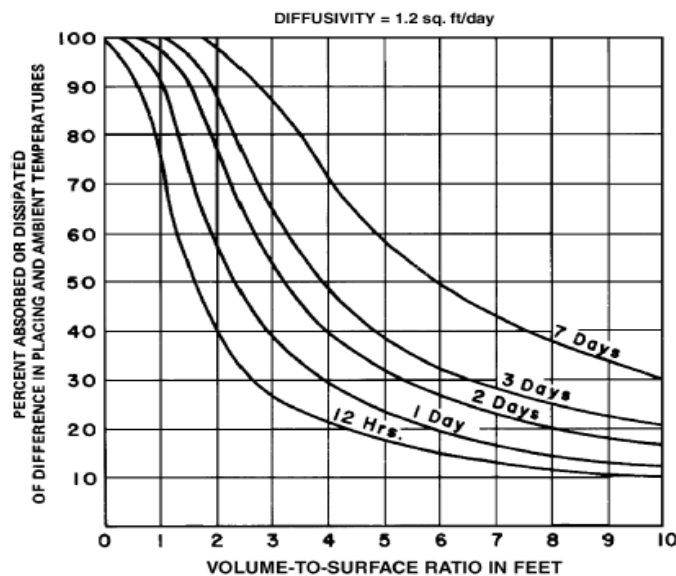


Fig. 4.6—Heat flow between air and concrete for difference between placing temperature and ambient air temperature.

**Figura 9.** Flujo de calor entre la temperatura de colocación y temperatura ambiente. **Fuente:** Bamonte, P., & Gambarova, P. (2010). Properties of Concrete.

### 2.3.3 Especificaciones del hormigonado para clima caliente y/o cálido – aci 305.

#### 2.3.3.1 Temperatura máxima permisible del hormigón.

El límite de temperatura máxima permisible del concreto fresco es de 35°C (95°F), a menos que se especifique lo contrario, si es aceptada una temperatura mayor esta debe ser admitida por un Arquitecto y/o Ingeniero, pero se debe basar en experiencias pasadas de campo o pruebas de pre-construcción utilizando una mezcla de concreto similar con resultados exitosos ante un estado de temperatura mayor.

Por lo que el concreto debe ser producido a una temperatura tal que al momento del hormigonado no exceda la temperatura permisible del concreto. Los métodos de producción aceptados para reducir la temperatura del concreto incluyen: almacenamiento de agregados bajo sombra, aspersión de agua en los agregados gruesos, utilización de agua helada para la producción de concreto, sustitución de hielo por agua de mezcla y enfriar materiales de concreto usando nitrógeno líquido.

### **Capítulo 3.**

#### **Metodología aplicada**

##### **3.1. Tipo de investigación.**

El tipo de investigación utilizado es una metodología descriptiva, porque se pretende evaluar termodinámicamente la cimentación de las estructuras principales del nuevo Puente Pumarejo; bajo la consideración de datos obtenidos de la temperatura interna y externa (ambiente) de las estructuras al momento de su hormigonado y su comportamiento en el tiempo. Además, se pretende garantizar que tanto los procesos constructivos aplicados para conformar las cimentaciones como los ensayos fueran pertinentes y correctamente aplicados con la finalidad de tener datos de primera mano obtenidos de manera eficiente y al momento de su aplicación.

##### **3.2. Diseño de la investigación**

Según lo expuesto por Herrera (2001), la resistencia a la compresión del concreto es una propiedad compleja que depende, no solamente de su composición intrínseca (diseño de la mezcla) y su elaboración, sino también varía con su edad y la temperatura a la cual se somete durante el fraguado, curado y endurecimiento. Desde la década de los setenta en Europa, los

investigadores Daneses Freisleben y Hansen (Instituto de Tecnología de Dinamarca), el Italiano J. Carino y los Norteamericanos Lew, Reichard, -Malhotra, Naik, Grove, Cable y Ragdy, el canadiense E.G. Nisbet, el chino Guo Cheng Ju, entre otros, han demostrado que a partir del perfil térmico del concreto (Curva de Temperatura vs. Tiempo), se puede establecer de manera exacta la resistencia del material sin necesidad de ensayos mecánicos, a partir del cálculo de la Madurez de la mezcla. (p.75).

Los encepados de cada una de las pilas del nuevo Puente Pumarejo, son concretos masivos por sus altos volúmenes según los diseños del proyecto ( $> 5000 \text{ m}^3 \text{ c/u}$ ), que han generado altas temperaturas en el proceso de fraguado. Para ayudar con este proceso y que el choque térmico con la temperatura ambiente, una vez desencofraran los elementos, no hiciera mayor daño a las estructuras, se realizaron las siguientes recomendaciones:

- Utilización de hielo en el proceso de producción de concreto.
- Utilización de ceniza en el cemento antes de preparar la pasta en concreto.
- Enfriamiento de agregados pétreos para concreto, con aspersores.
- Ensombrecimiento de áridos.
- Utilización de fibras térmicas para controlar los choques térmicos
- Monitoreo masivo de control de temperaturas con termocuplas.

Una de las prioridades en el desarrollo de este proyecto es la de evaluar el control de temperaturas por medio de termocuplas en cada fase de hormigonado de las cimentaciones de las pilas más representativas del proyecto.

La temperatura será medida por medio de termocuplas tipo K, estas termocuplas fueron utilizadas por su alta resistencia térmica, las termocuplas son instaladas en puntos específicos de la geometría de los encepados donde se requiere tomar mediciones; generalmente se posicionan

en el centro del elemento, en una de las puntas y a un costado del mismo. Las termocuplas se conectan con un terminal llamado DATALOGGER, donde se programa la toma de datos y registra automáticamente cada cierto tiempo de la temperatura del elemento en el que se encuentre instalado de hasta 4 termocuplas para procesar la información y tener datos a tiempo real.

La geometría de las estructuras a estudiar es analizada estratégicamente para definir puntos donde se tomarán los datos, esto se debe a que en el núcleo de la estructura por su densidad y confinamiento se presentan mayores incrementos de temperatura comparado con las puntas del elemento, probablemente porque no tiene contacto con la temperatura ambiente, la altura a la que se toman los datos también debe variar para conocer en diferentes puntos el comportamiento de la temperatura.

Al tener toda la información (temperatura ambiente y de la estructura) definida en el tiempo establecido se analizará estadísticamente los datos arrojados por los DATALOGGER y así conocer en el tiempo cuando la temperatura del elemento es  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  comparado con el ambiente, para evaluar el momento indicado donde la posibilidad de agrietamientos y fisuras sea el menor.

### **3.3. Alcances y limitaciones**

El proyecto investigativo tiene como alcance evaluar la termodinámica de las estructuras masivas de concreto del puente Pumarejo, en las pilas principales del tramo atirantado, pilas 13 y 14.

Los aspectos puntuales que comprende la investigación están referidos al tiempo y el desarrollo de las temperaturas, dentro de los cuales abarca los temas de colocación y disposición de los equipos de instrumentación.

No se incluirá el tema de resistencias de los elementos estructurales, tampoco se tendrá en cuenta el costo/beneficio de la implementación del sistema de termocuplas debido a que no se cuenta con parámetros de comparación.

Inicialmente, las termocuplas deben ser ensambladas correctamente para su buen funcionamiento, estas se deben acoplar por medio de un cable con unos conectores que van anidados, al momento de hacer las mediciones; se presentaban fallas en las termocuplas porque no quedaban bien conectadas, la batería quedaba sin carga, los cables se alcanzaban a mojar, los obreros por desconocimiento cortaban los cables, se debe garantizar que las termocuplas midieran el concreto y no el acero.

Se debe tener muy claro las dimensiones de las estructuras donde se va instalar, donde se concentra el mayor calor es el núcleo de la estructura, es por esto que las dimensiones son importantes, dependiendo de lo que se busque tener, se ubica la termocupla. También es muy importante ubicar las termocuplas cercanas a las esquinas para saber la temperatura más cercana al encofrado o ambiente.

Generalmente, se instala un tubo y por ahí se introducía el cable (termocupla) para tocar el concreto y tener disponibilidad afuera del elemento para coger los datos. Al igual que el ambiente, se debe proteger siempre se optó por tener unas termocuplas de respaldo.

Es importante aclarar que no es el objeto de esta investigación que los datos, análisis y resultados sean tenidos en cuenta para nuevos estudios o desarrollo de nuevos proyectos con la misma temática.

Este estudio investigativo solo tiene validez para el proyecto del NUEVO PUENTE PUMAREJO de Barranquilla, la información y datos obtenidos a lo largo de la investigación no son aplicables en otros proyectos.

Por lo tanto, queda fuera del alcance de este documento el estudio de la evolución de las resistencias del concreto al interior del encepado, ya que el objetivo principal del mismo es conocer el desarrollo de las temperaturas alcanzadas en las estructuras principales del proyecto. No es el objeto de este proyecto proponer medidas preventivas que garanticen la correcta colocación del concreto en una zona de clima calurosa.

## **Capítulo 4.**

### **Análisis de resultados**

Los resultados obtenidos de acuerdo a los procedimientos utilizados desde la ubicación donde estarán instaladas las termocuplas, hasta el análisis del desarrollo de las temperaturas máximas alcanzadas y ambiente, se analizarán de acuerdo a las siguientes estructuras:

- Encepado pila 13 fase 1.
- Encepado pila 13 fase 2.
- Encepado pila 13 fase 3.
- Encepado pila 14 fase 1.
- Encepado pila 14 fase 2.
- Encepado pila 14 fase 3.

El concreto masivo deberá cumplir con los requisitos que se tengan en cuenta en las *ESPECIFICACIONES DE CONCRETO ESTRUCTURAL* reportadas en el comité 301 de la ACI,



a menos que se especifique de otra manera en los Documentos Contractuales. Los siguientes criterios se deberán aplicar para la colocación de concreto masivo:

- La temperatura máxima del concreto después de la colocación no deberá exceder 70°C (158°F).
- La diferencia máxima de temperatura entre el centro y la superficie del vaciado no deberá exceder 19°C (35°F). (ACI301-10, 2010)

#### 4.1. Encepado pila 13 fase 1

En esta evaluación, se dispusieron 3 termómetros con terminales distribuidos de la siguiente manera en los primeros 0.6m de altura de la fase #1.

**Tabla 4.**

*Termocuplas en Fase 1, P13.*

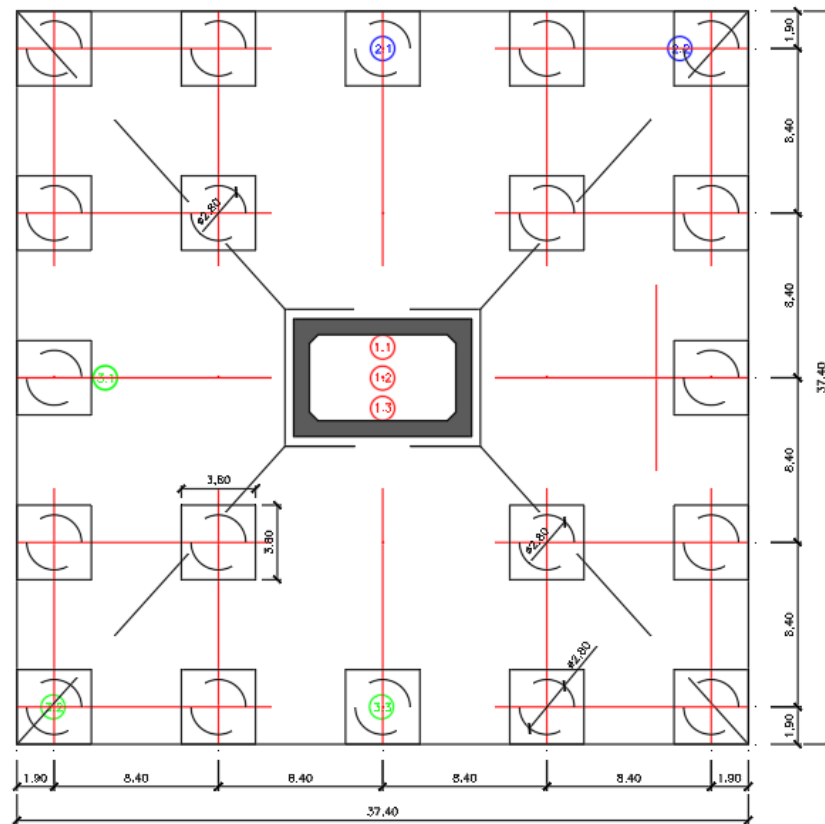
TERMOCUPLAS EN FASE 1 PILA 13; h:0.6m.			
TERMOMETRO	NOMENCLATURA EN PLANO DE TERMOMETROS		
#1	1.1	1.2	1.3
#2	2.1	2.2	
#3	3.1	3.2	3.3

*Fuente:* Propia del autor, 2019.

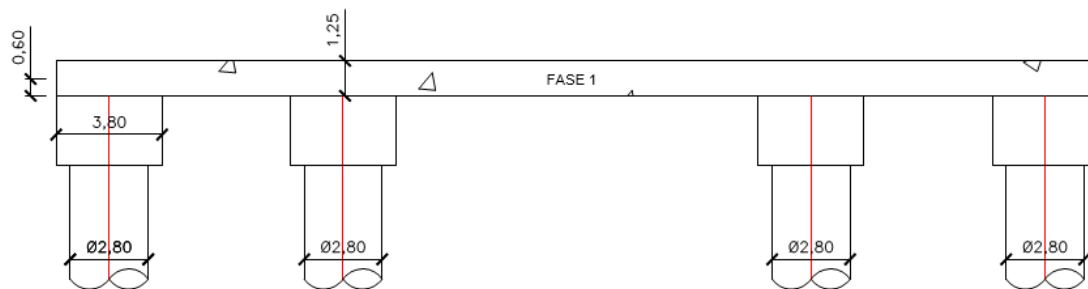
La teoría habla de que, en el núcleo o centro de la geometría de las estructuras masivas de concreto, es donde mayor generación de calor se produce porque es el punto donde más trabajo cuesta disipar el calor, es por esto, que en este punto se disponen 3 terminales para la medición de la temperatura (resaltados en rojo).

Es muy importante conocer la temperatura en las puntas o esquinas de los elementos a evaluar, porque es aquí donde se coloca el encofrado que da el confinamiento al momento de hormigonar, es el punto más cercano a captar temperatura ambiente, estos terminales son generalmente los resaltados en azul.

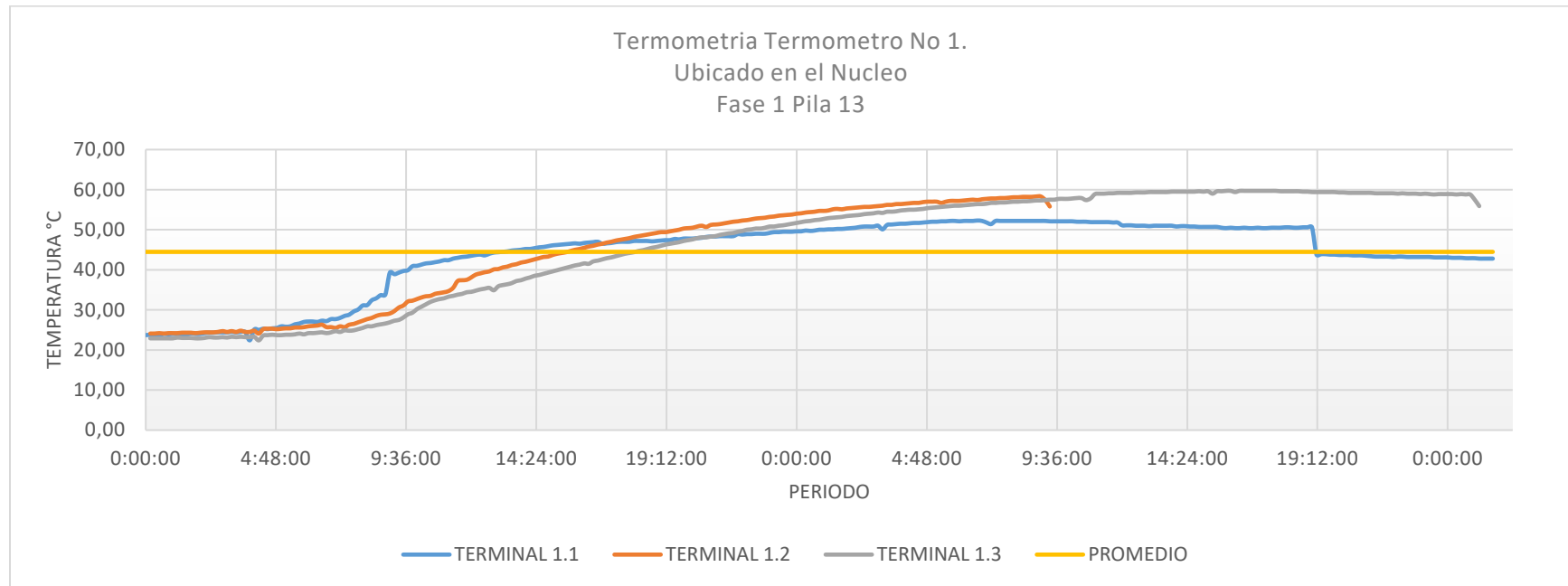
Además de los puntos críticos mencionados anteriormente, se tuvo en cuenta para la toma de datos puntos variables a lo largo de toda la dimensión del elemento, de esta manera, se conoce como es el comportamiento térmico en diferentes puntos del elemento en el mismo tiempo.



**Figura 10.** Ubicación termocuplas en encepado Pila 13, Fase 1 (vista en planta). **Fuente:** Propia del autor, 2019.

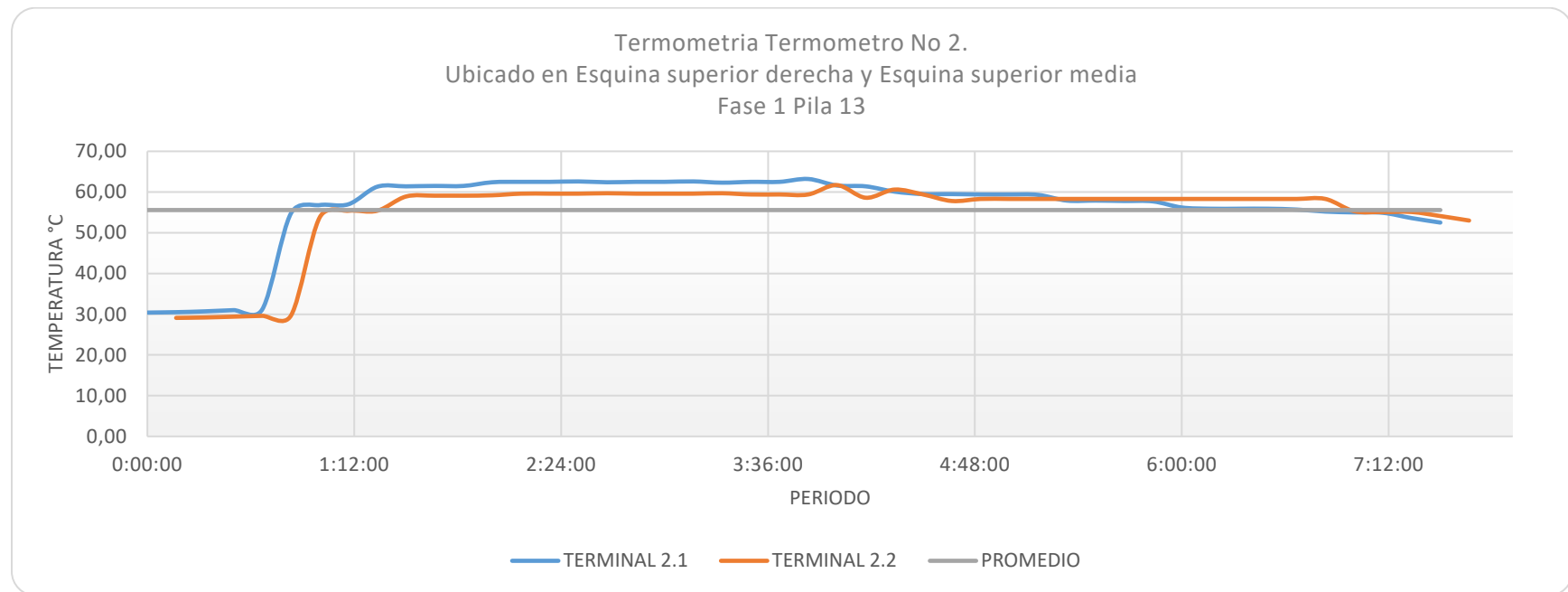


**Figura 11.** Vista en perfil, Fase 1, Pila 13. **Fuente:** Propia del autor, 2019.



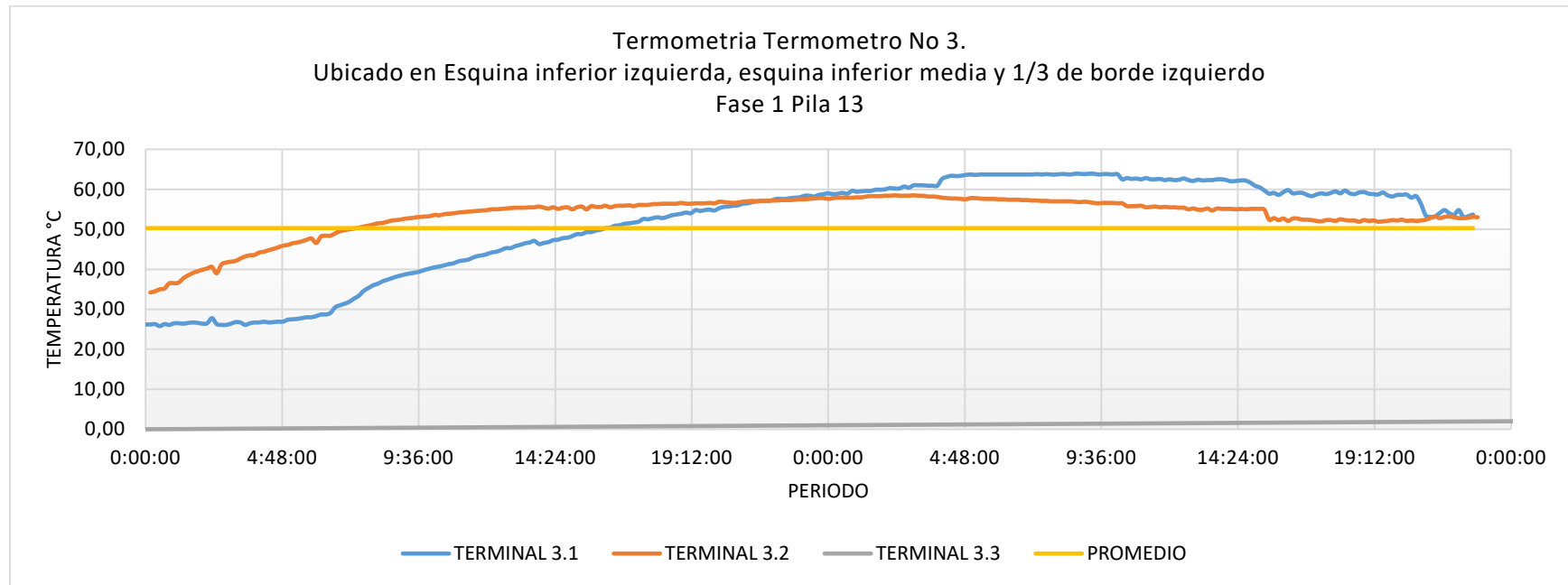
**Figura 12.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P 13. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 3 terminales fue de 56,7°C, se generó entre las 38h y 43h de hormigonado respectivamente durante el tiempo de análisis y estudio de la Fase 1, P13. Entre los 3 terminales se tuvo un promedio 44,48°C a lo largo de todo el tiempo evaluado que en esta fase fue de 60h. La hora de inicio de esta fundida fue a las 14:00 del día 01/05/2017, el punto máximo de temperatura se dio en el rango de las 12:00 y 14:00 dos días después del inicio de la fundida.



**Figura 13.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

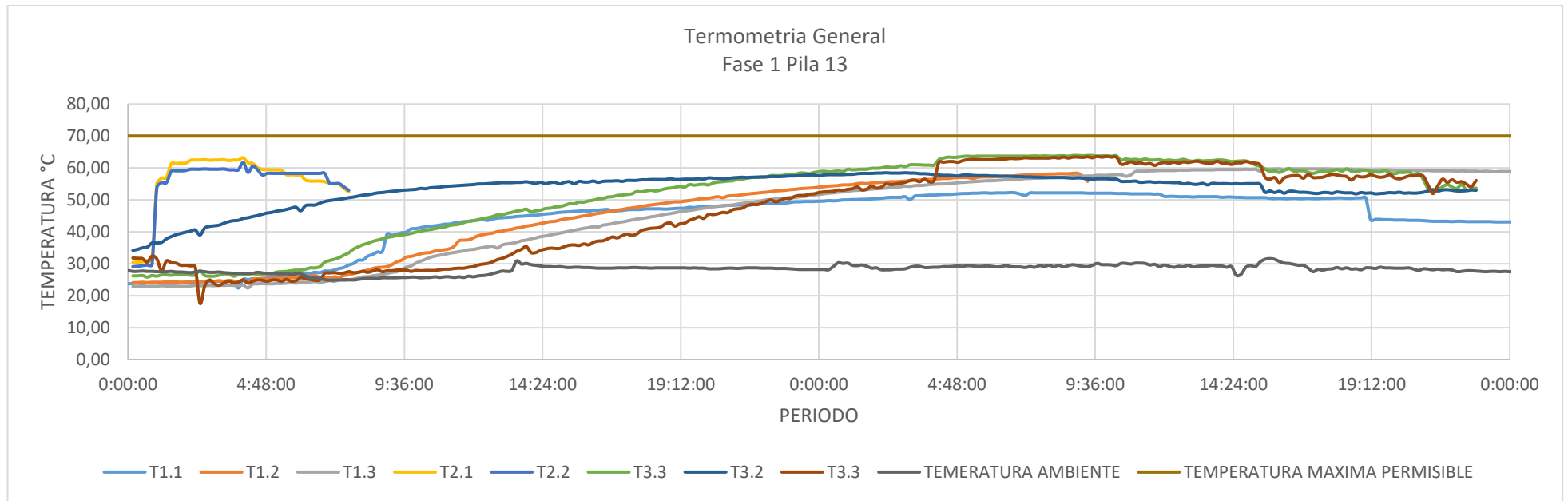
En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 2 terminales fue de 62,4°C y se dio a las 3.5H de hormigonado, el DATALOGGER, se quedó sin batería a la hora de iniciar la medición y fue recargado nuevamente a las 0.5h, por lo que se tiene un salto en la gráfica muy significativo. En promedio se tuvieron resultados de 55,57°C en 7.2h de medición registradas teniendo en cuenta las horas en que el equipo se quedó sin baterías.



**Figura 14.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor. 2019.

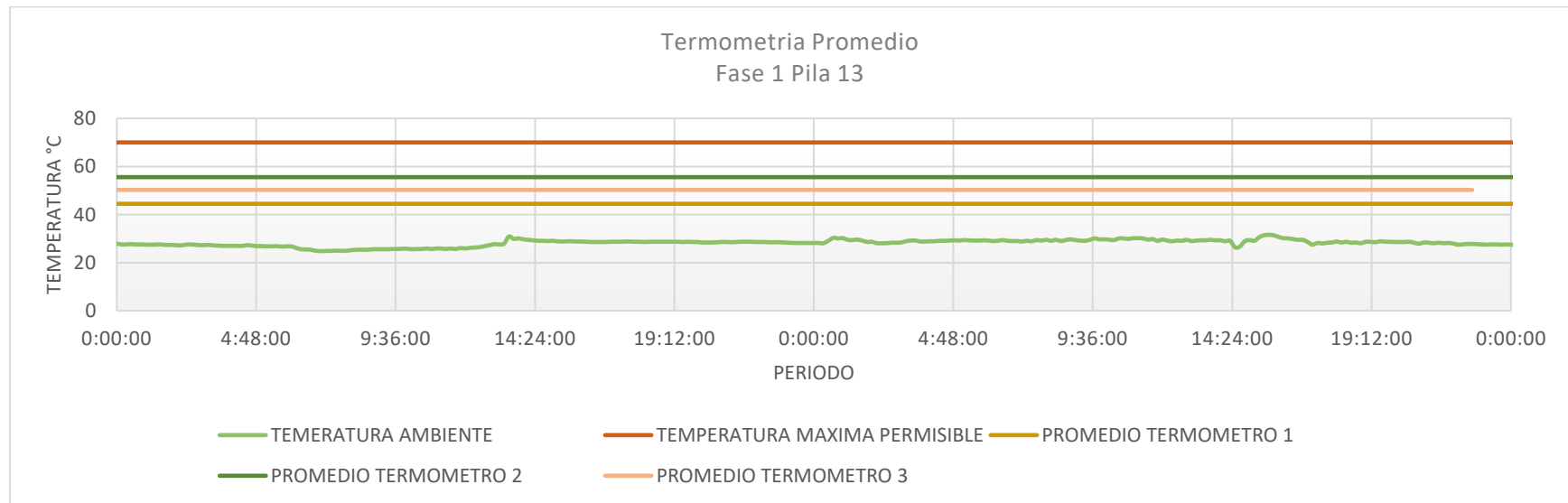
En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 3 terminales fue de 62°C y se da alrededor de las 34h de hormigonado.

La temperatura promedio fue de 50,2°C.



**Figura 15.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P13. **Fuente:** Propia del autor. 2019.

En esta grafica se agrupan todos los resultados obtenidos en la F1 del encepado en P13, al revisar es muy fácil notar que los puntos máximos de la temperatura se dan en el rango de las 38h del inicio de la fundida, es decir a las 3:00 dos días posteriores. Se maneja una temperatura ambiente constante de 28°C.

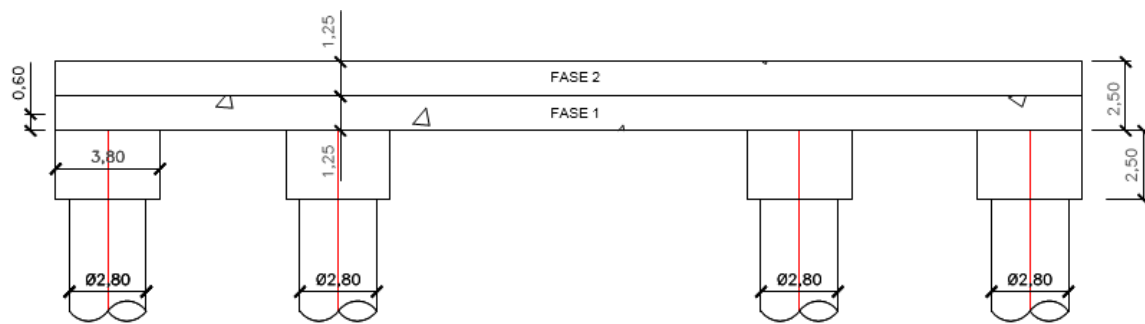


**Figura 16.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F1 P13. **Fuente:** Propia del autor. 2019.

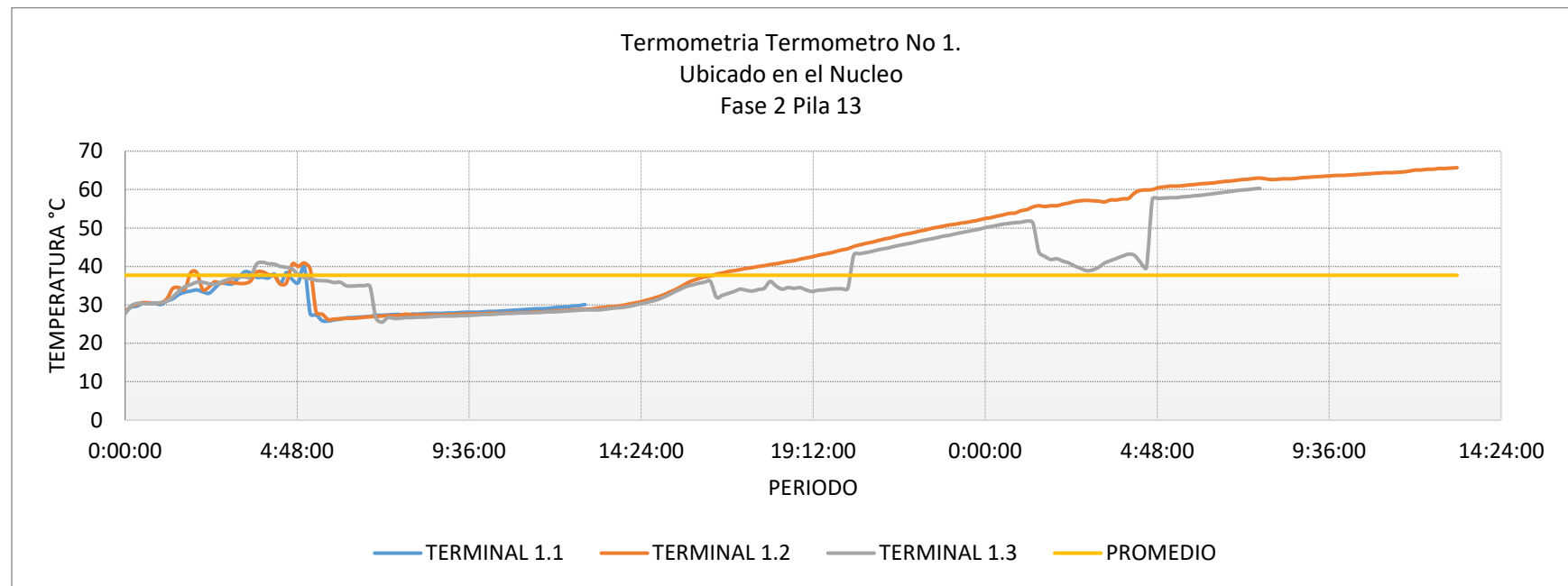
Previamente, se habló de que la temperatura máxima permisible de colocación del concreto es de 70°C, la línea marrón marca ese límite. En ninguno de los puntos se logró superar esta franja, aunque se tuvieron mediciones muy cercanas a ese nivel, se mantuvo en un rango permisible. La temperatura ambiente también fue marcada en esta gráfica; se manejó en promedio 28°C, por lo que se puede llegar a que en promedio la temperatura del concreto aumenta 43,8% respecto al ambiente, para un volumen de concreto instalado de 1576 m<sup>3</sup>. Las temperaturas máximas se dieron en la parte superior del encepado (aguas arriba), alrededor de 62°C.





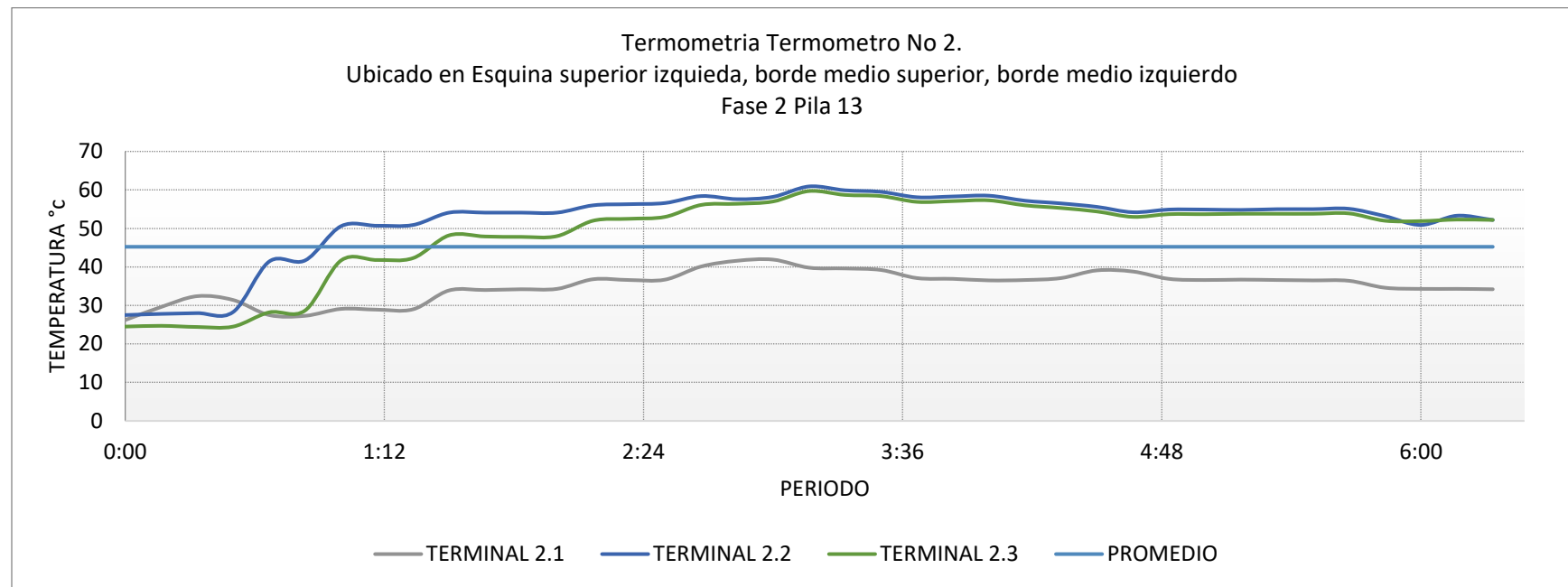


**Figura 18.** Vista en perfil, Fase 2, Pila 13. **Fuente:** Propia del autor, 2019.



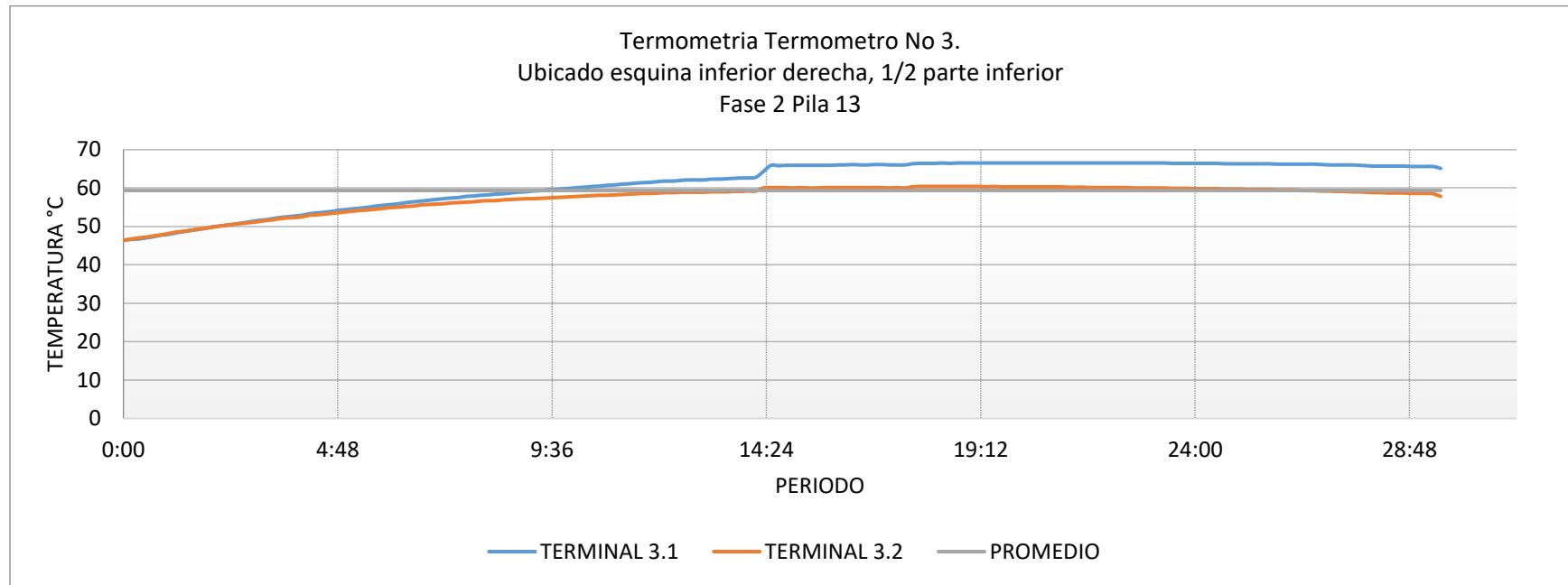
**Figura 19.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 3 terminales fue de 55,3°C, el terminal donde se alcanza mayor temperatura es el 1,2 que se encuentra posicionado justo en el centro de la estructura, llegando a 65,7°C y se da a las 35h de hormigonado, la fundida inicio el día 13/05/2017 a las 07:30. El promedio de la temperatura alcanzada fue de 37,7°C; este dato tiene una alta desviación debido a que el terminal 1.1 y 1.3 no recopilaban toda la información a lo largo del tiempo programado.



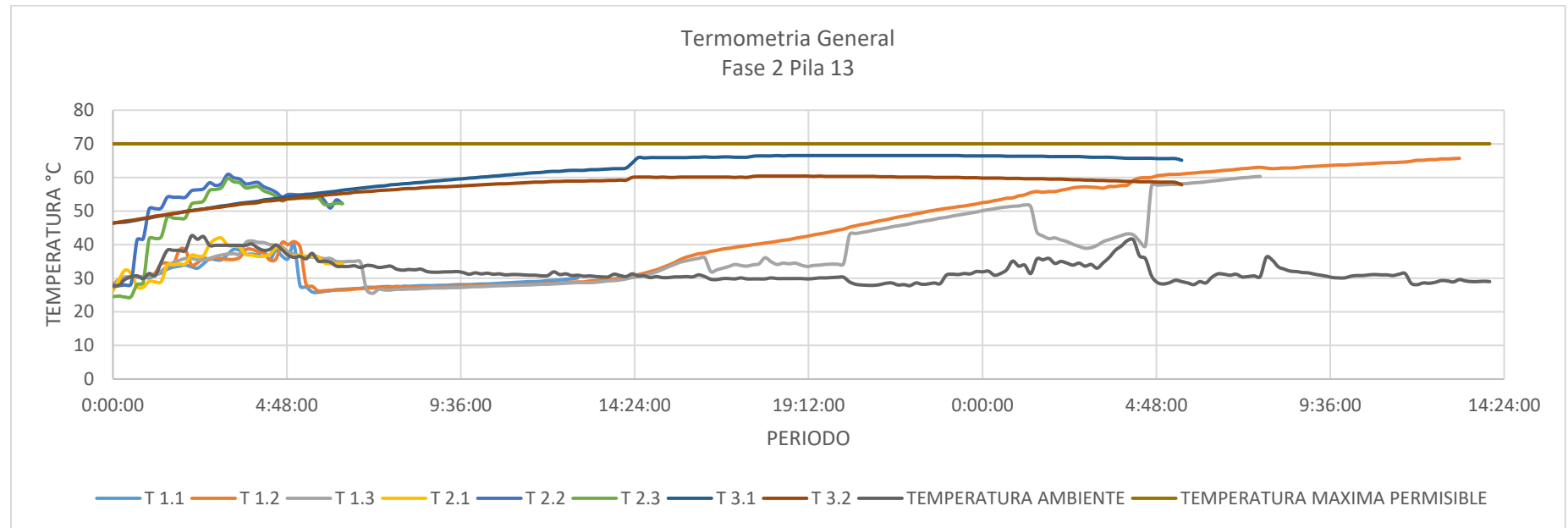
**Figura 20.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Esta medición solo registro 6h de datos a partir del inicio de la fundida debido a que durante la fundida los cables fueron cortados por desconocimiento del personal de obra, en promedio la temperatura máxima alcanzada por los terminales 2.1, 2.2, 2.3 es de 54,1°C, el terminal donde la temperatura alcanza a subir más es el 2.2, ubicado en la esquina superior izquierda, registrando 60,9°C que se da a las 3h del inicio de las mediciones, el promedio registrado para este termómetro fue de 45,2°C.



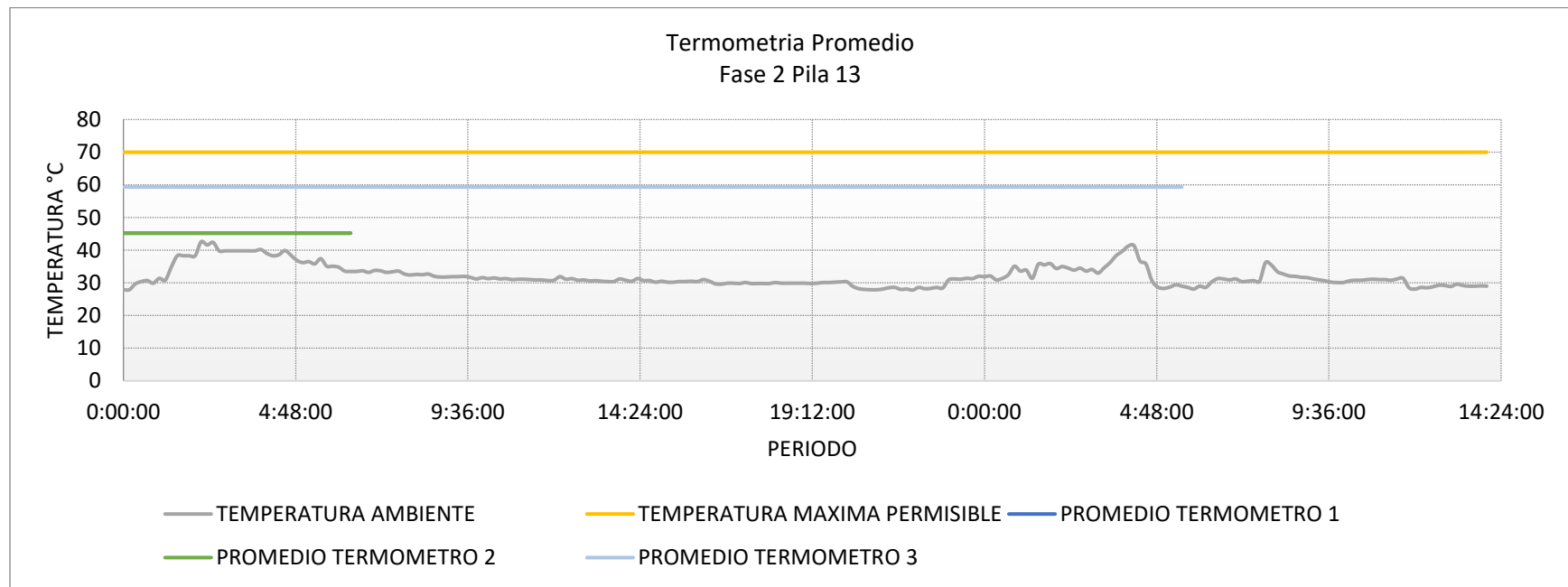
**Figura 21.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P13. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Solo se ubicaron 2 terminales, cada uno de ellos registro información por 30h a partir del inicio de la fundida, alcanzaron valores muy similares a pesar de la diferencia en la ubicación de los mismos. La evolución de las temperaturas máxima fue de 63,4°C, el rango de registro más alto alcanzado fue de 66,5°C en el terminal 3.1 valor obtenido a las 18.5h del inicio de los datos registrados que iniciaron a las 18:00.



**Figura 22.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo, en fase 2, P13. *Fuente:* Propia del autor, 2019.

En esta grafica se agrupan todos los resultados obtenidos en la F2 del encepado en P13, el inicio de esta fundida se dio a las 7:30, por lo que en la Grafica 9. Los valores que estén en el rango de las 4h y 9h serán los más cercanos al medio día, punto crítico en cuanto al alza de la temperatura ambiente en Barranquilla, este dato también se puede observar en la línea negra, hay picos en estos momentos de los datos registrados. No se supera el umbral que por literatura se tiene de 70°C.



**Figura 23.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F2 P13. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En promedio los termómetros que registraron los datos de los terminales 1 y 2 llegaron a valores muy cercanos por lo que en la Grafica 10. Están superpuestos estos datos. Sin embargo, como se tuvo problemas con el DATALOGGER, que no registro a inicio el tiempo programado, estos resultados obtenidos en los terminales ya mencionados no deberían ser tenidos en cuenta, pero el terminal 3 que se logró captar mayor cantidad de información, llegando a un promedio de 59,3 °C si da un valor cercano a los esperados. El volumen de concreto instalado para esta fase fue de 1500 m<sup>3</sup>.

4.3. Encepado pila 13 fase 3

Tabla 6.

Termocuplas en Fase 3, P13

TERMOCUPLAS EN FASE 3 PILA 13; h:2.65m			
TERMOMETRO	NOMENCLATURA EN PLANO DE TERMOMETROS		
#1	1.1	1.2	1.3
#2	2.1	2.2	
#3	3.1	3.2	
#4	4.1	4.2	

Fuente: Propia del autor, 2019.

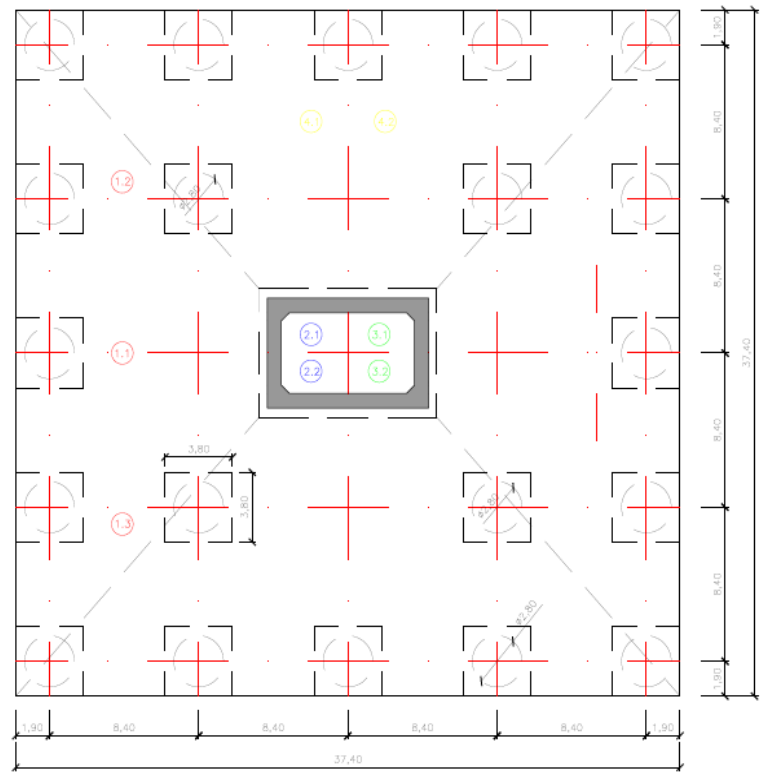
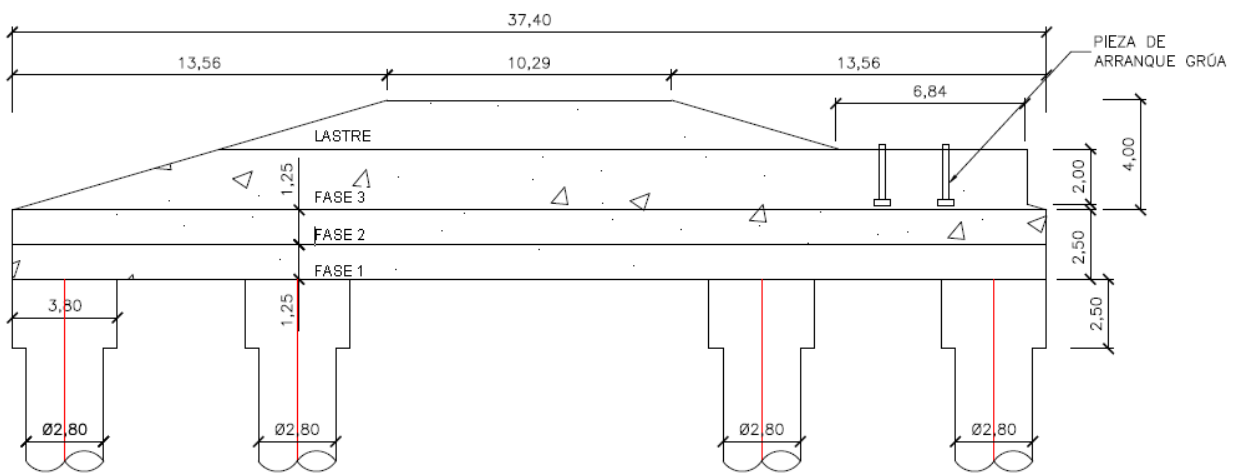
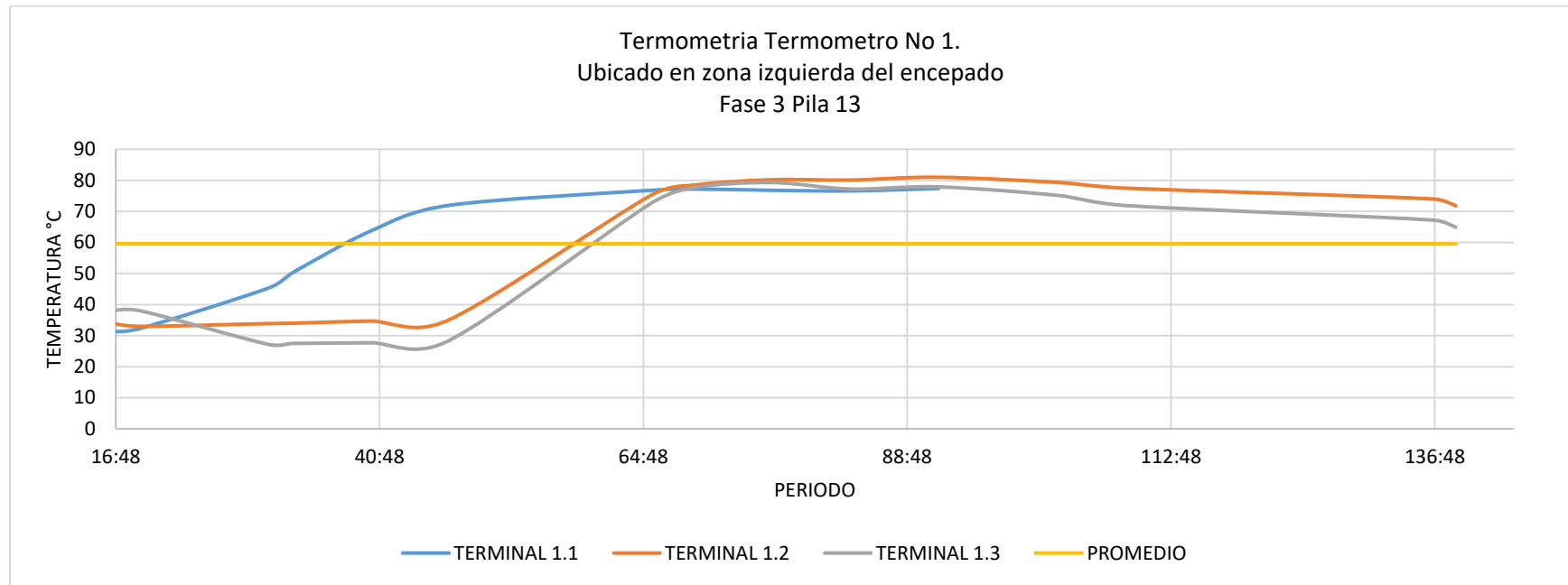


Figura 24. Ubicación termocuplas en encepado Pila 13, Fase 3 (vista en planta). Fuente: Propia del autor, 2019.



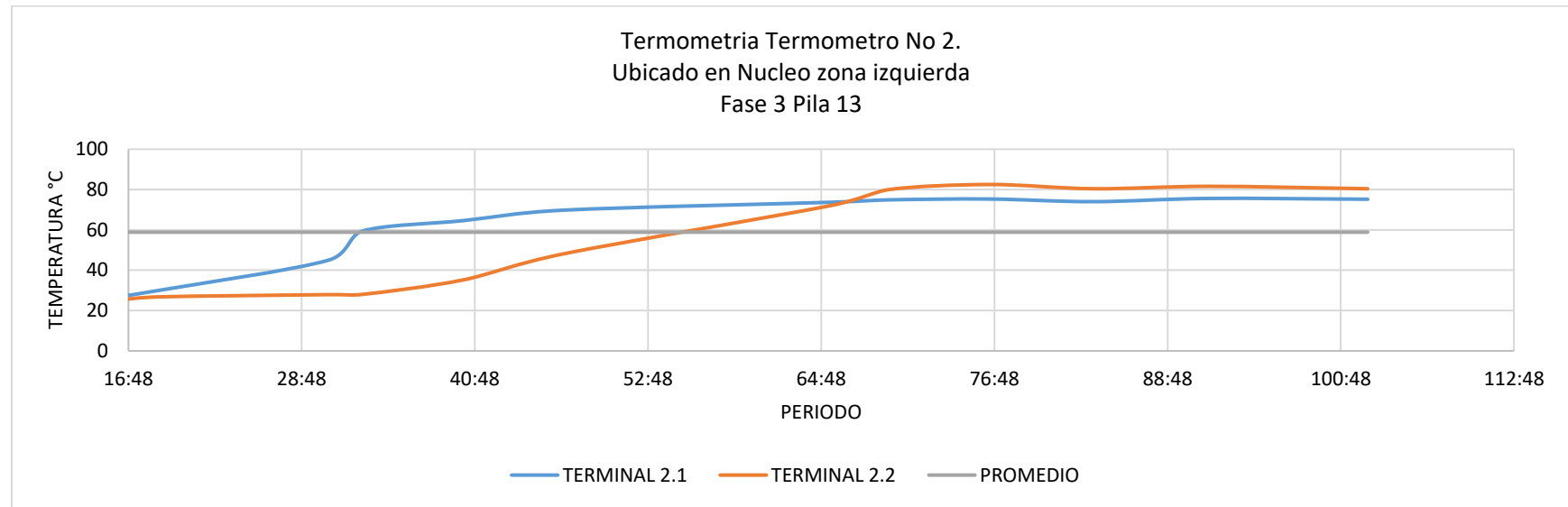


**Figura 25.** Vista en perfil, Fase 3, Pila 13. *Fuente:* Propia del autor, 2019



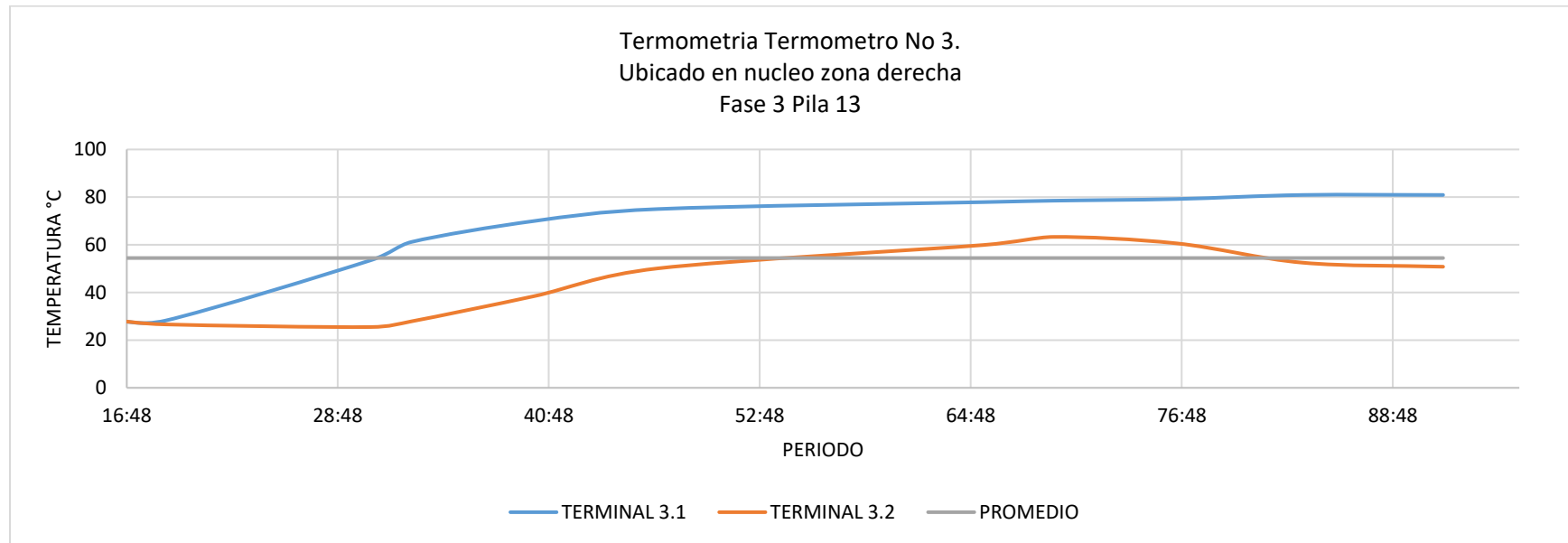
**Figura 26.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En esta medición el termómetro No 1. Se ubico en la zona izquierda del encepado para evaluar el comportamiento especifico de estos puntos. El inicio de la toma de datos se dio a las 09:00 del día 06/06/2017. En general se tuvo un comportamiento uniforme en los resultados obtenidos, entre los tres terminales la temperatura máxima fue de 78,7°C, el terminal 1.2 fue el de mayor temperatura alcanzada, 81°C, los otros dos tuvieron temperaturas de 77, 4°C para el 1.1 y 77,9°C.



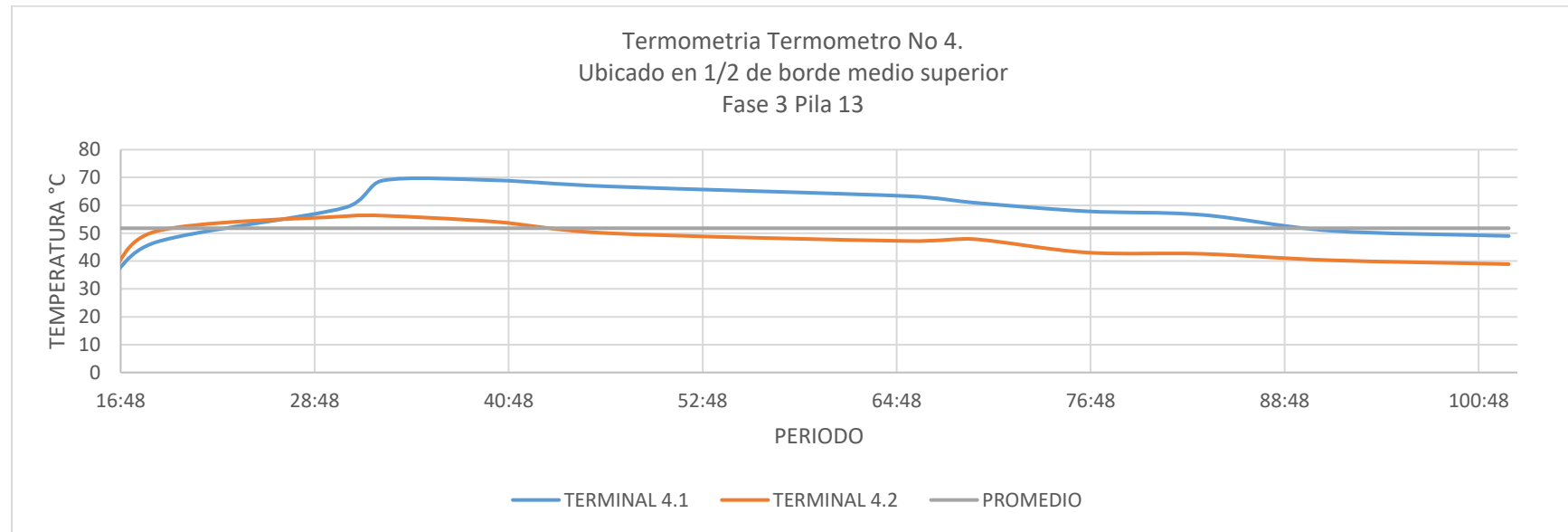
**Figura 27.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Para esta medición hubo un diferencial inicial de temperaturas a las 30h de inicio de las mediciones, que estuvo para el terminal 2.1 en 45°C y para el 2.2 de 27,9°C probablemente debido a algún error en el DATALOGGER, sin embargo, a partir de aquí el resto de las mediciones tuvieron un comportamiento admisible para la cercanía en las ubicaciones de los terminales. En promedio las temperaturas máximas de estos dos fueron de 79,1°C, el 2.1 es el que mayor temperatura alcanza llegando a 82,5°C y el promedio de las dos mediciones es de 58,8°C.



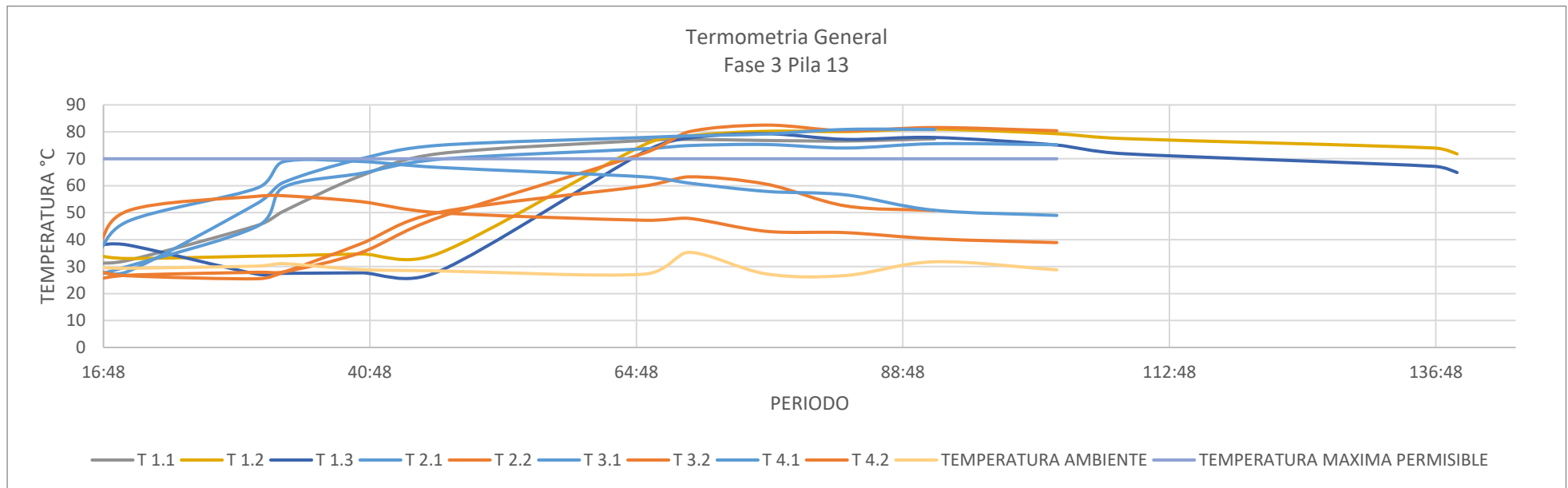
**Figura 28.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

El comportamiento de esta grafica es muy similar al anterior, donde los terminales están muy cercanos entre ellos, y se presenta el mismo caso del resalto de temperatura en unas horas específicas. En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 2 terminales principales fue 72,1°C., pero uno de ellos llega a tener una medición hasta de 80,9°C.



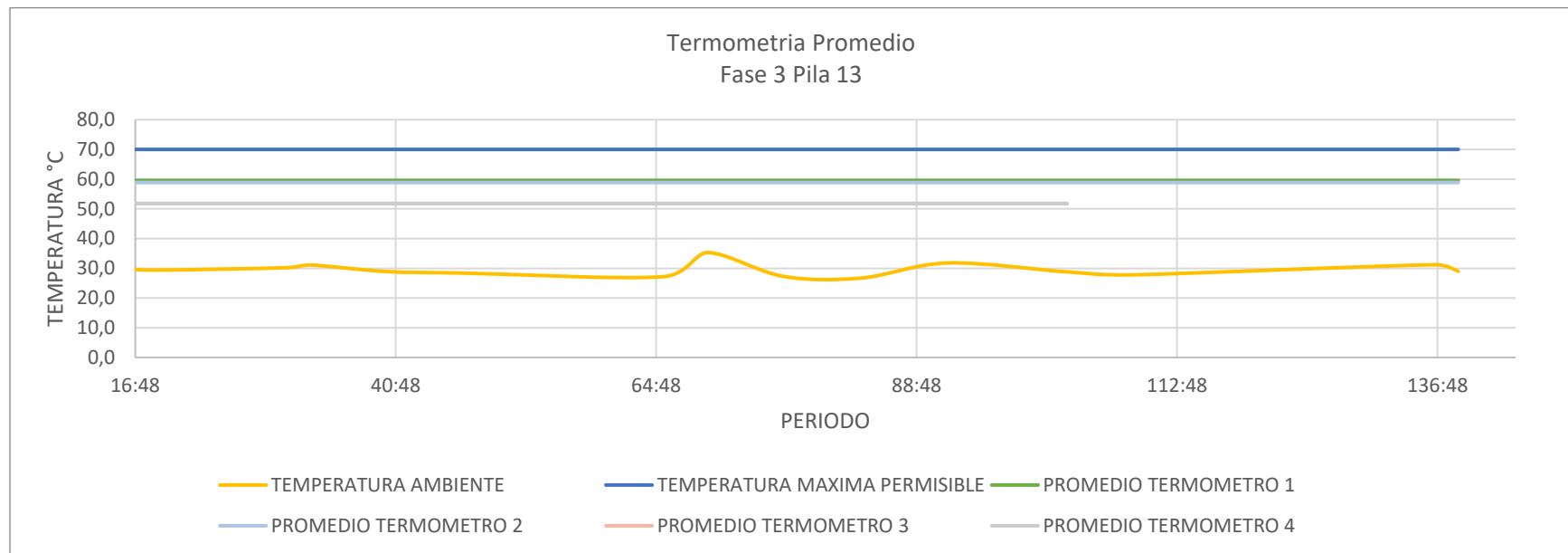
**Figura 29.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. Termómetro #4. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Los terminales ubicados a  $\frac{1}{2}$  del borde medio superior están muy cercanos el uno del otro, se quiso comprobar si se tenían grandes diferencias en variaciones cortas de la posición. Para este caso el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo fue muy similar en los dos terminales instalados. Entre las 19h y 30h de inicio de la fundida se tiene un salto de la temperatura de 28,2°C a 53°C, que se nota en el Grafico 14. Luego de 64h desde el inicio de la fundida, la temperatura empieza a disminuir. La máxima alcanzada fue de 80,9°C para el terminal 3.1 y en promedio se alcanzó 54,4°C.



**Figura 301.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P13. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Al juntar todos los resultados en el Grafico 15. Se aprecia que la mayoría de las mediciones superan el rango recomendado por la normativa de 70°C, cabe destacar que la fundida de F3 P13 es la fundida con más volumen de concreto comparado con las fases anteriores, el volumen fue de 2471 m<sup>3</sup>, esta fundida aumenta tanto su volumen con respecto a las demás porque se incluye el lastre de la pila, y los ensayos realizados se tienen en cuenta las dos secciones.



**Figura 31.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F3 P13. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En cuanto a los promedios obtenidos de las máximas temperaturas de la Fase 3 se manejaron en un rango entre 51°C y 60°C, lo que quiere decir que las temperaturas máximas promedio alcanzadas llegan hasta un 79,2% de la capacidad permisible por norma de temperatura máxima y con respecto al ambiente, la temperatura del concreto aumenta 46,3% según la media de temperaturas máximas.

4.4. Encepado pila 14 fase 1

Para la representación gráfica de las fases de la P14, se obviar  la vista en perfil de los encepados, ya que visualmente es igual a las fases de P13.

Tabla 7.

Termocuplas en Fase 1, P14.

TERMOCUPLAS EN FASE 1 PILA 14; h:0.6m			
TERMOMETRO	NOMENCLATURA EN PLANO DE TERMOMETROS		
#1	1.1	1.2	
#2	2.1	2.2	2.3
#3	3.1	3.2	3.3

Fuente: Propia del autor, 2019.

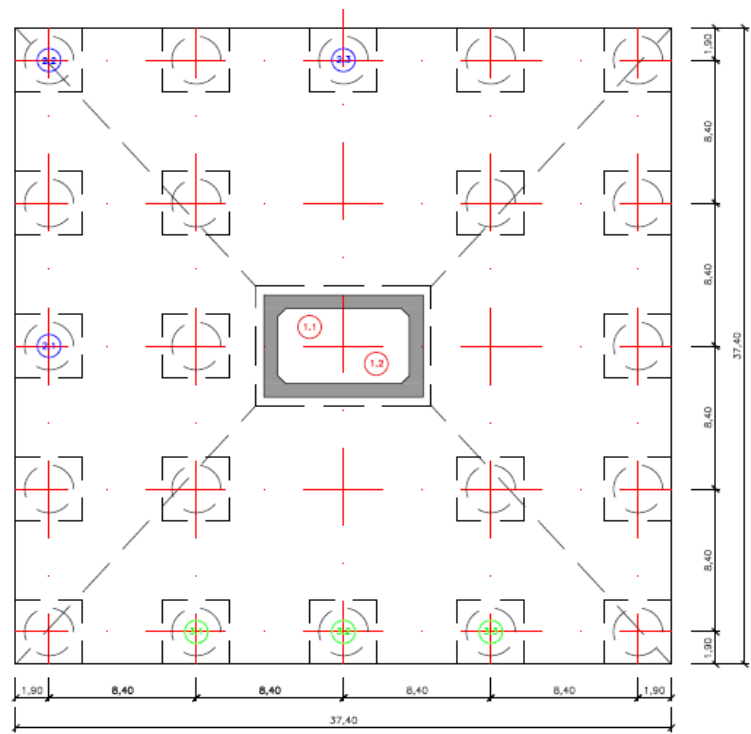
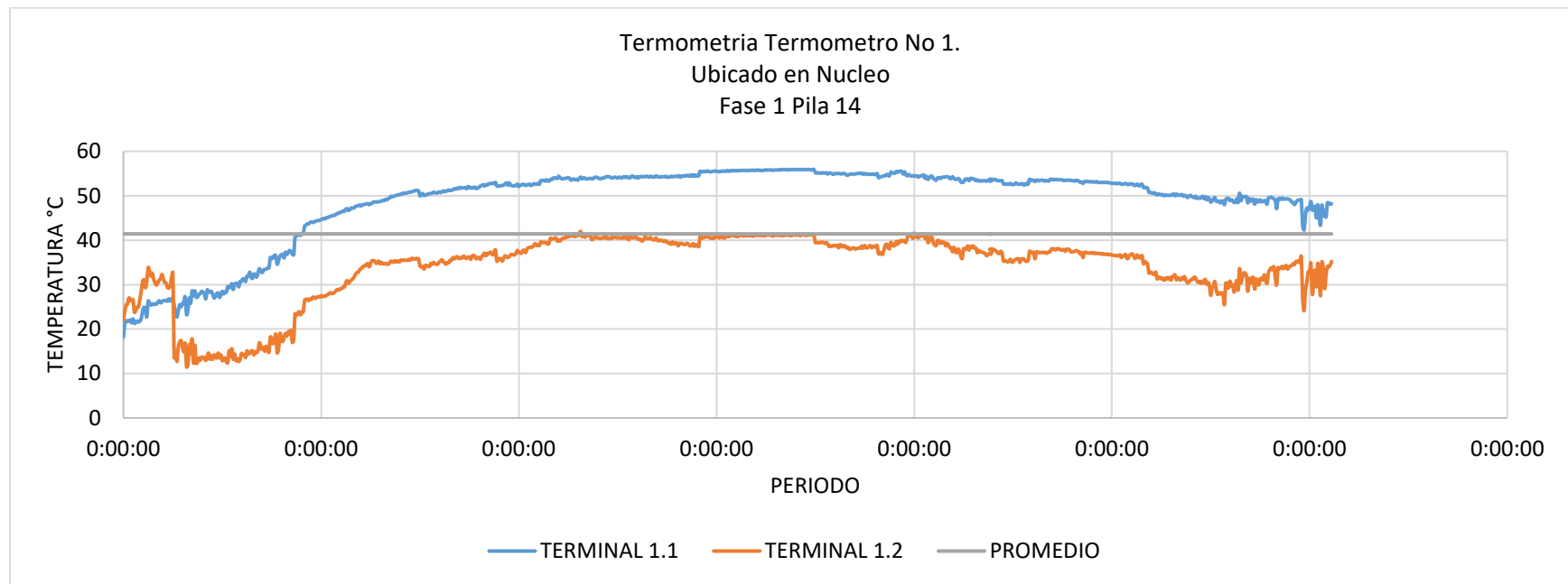


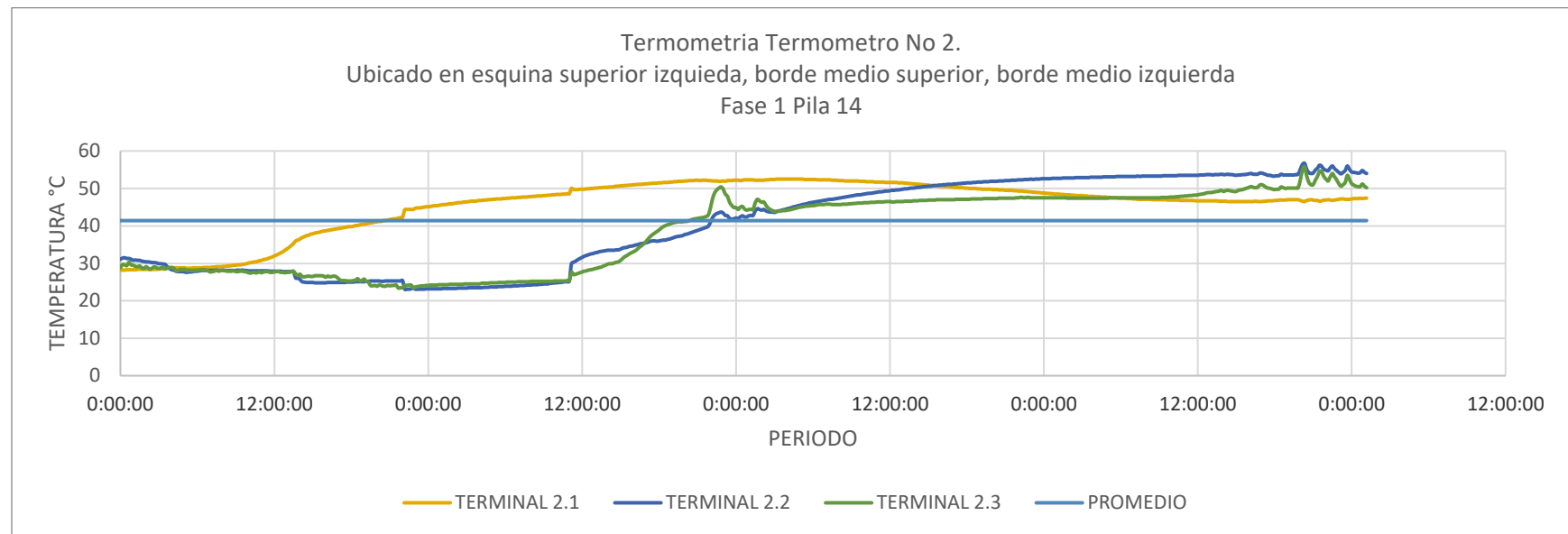
Figura 32. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14, Fase 1 (vista en planta). Fuente: Propia del autor, 2019





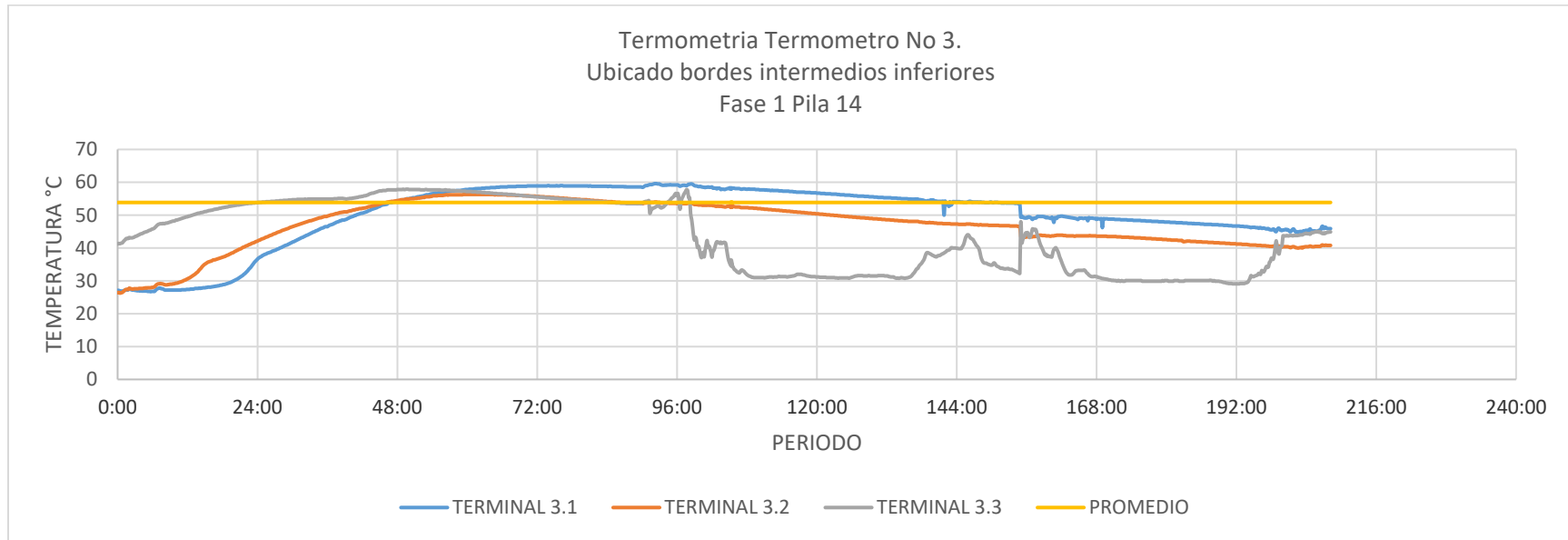
**Figura 33.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 2 terminales fue de 55,9°C y 42°C respectivamente para cada terminal, se dio a las 83.5H de hormigonado. En promedio se tuvieron resultados de 41,42°C en 146h de mediciones registradas. Esta fundida inicio el día 17/06/2017 a las 05:30, los datos máximos alcanzados desde la hora de inicio corresponden a las 13:50.



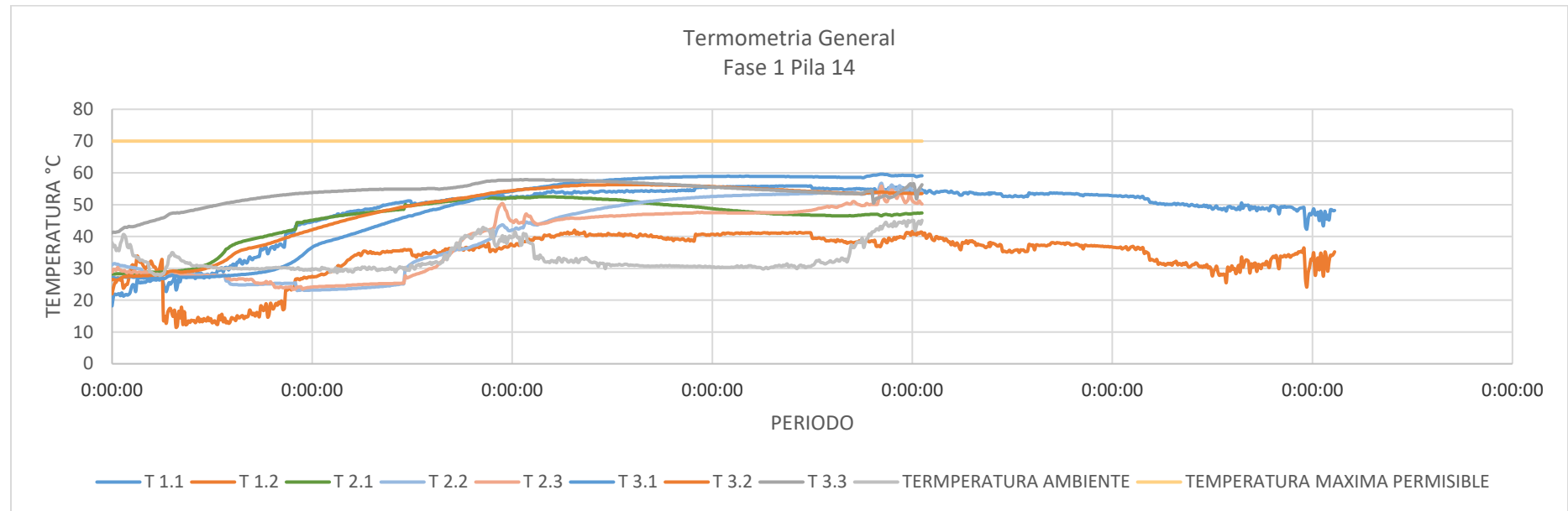
**Figura 34.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 3 terminales fue de 55°C, el terminal donde se alcanza mayor temperatura es el 2.2 que se encuentra posicionado justo en la esquina superior izquierda de la estructura, llegando a 56,7°C y se da a las 92.2h de hormigonado. El promedio de la temperatura alcanzada fue de 41,4°C. al iniciar el ensayo se tiene que el terminal 2.1 con respecto a los otros dos tiene un incremento prematuro de la temperatura, pero al pasar las horas este se nivela con los otros dos terminales manejando un rango de temperatura muy cercano.



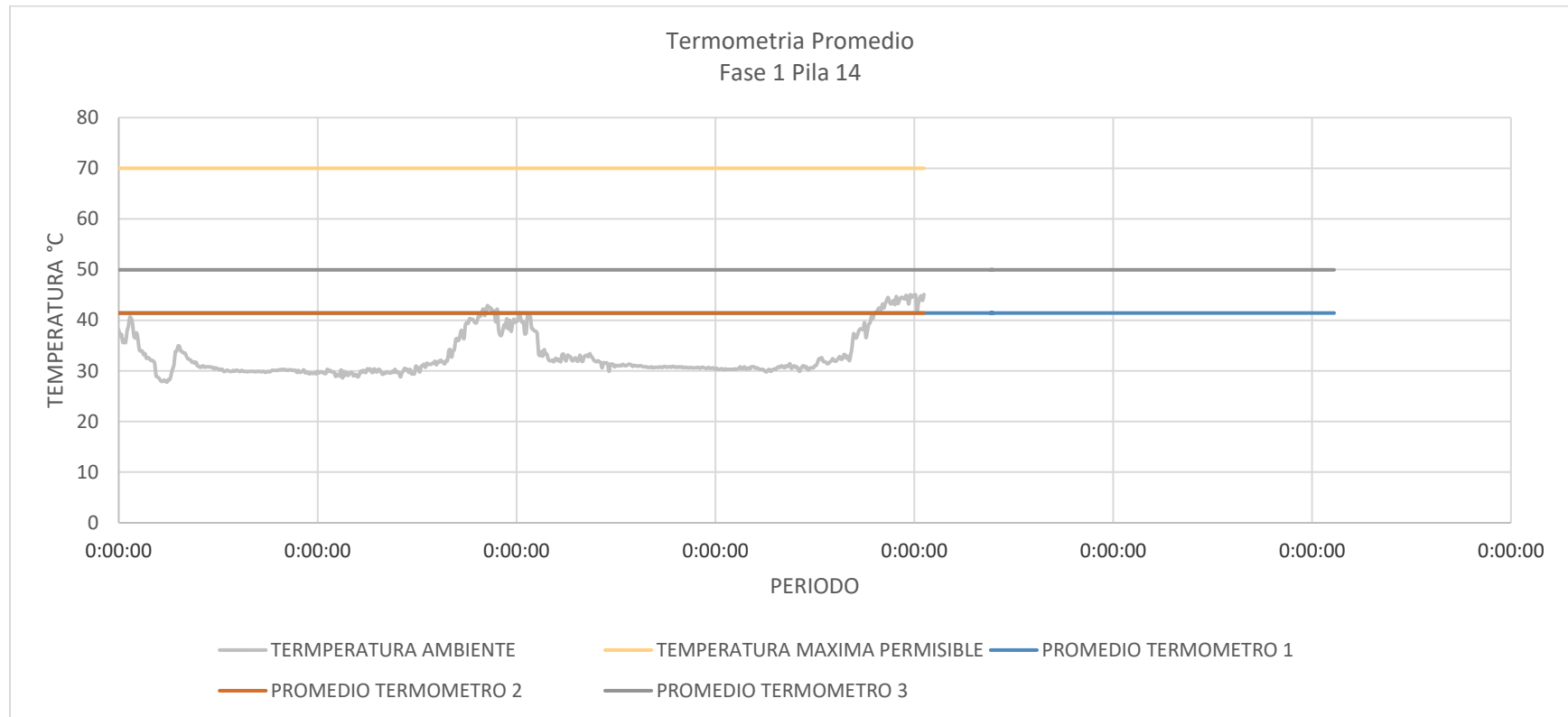
**Figura 35.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En este caso los tres terminales iniciaron de forma uniforme sus mediciones, hasta que el terminal 3.3 empieza a tener variaciones debido a problemas con el DATALOGGER, intenta recuperar señal pero los datos ya se encuentran alterados, por lo que su medición no es confiable, sin embargo los terminales 3.1 y 3.2 no tienen grandes variaciones y tienen rangos de 59,6°C y 56,3°C respectivamente de máximas temperaturas, que son alcanzadas a las 92h en ambos terminales.



**Figura 36.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 1, P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Al juntar todas las mediciones en el Grafico 20. Encontramos que todos los resultados están por debajo del rango permisible, esto es porque se trataron de controlar un poco más las condiciones de las fundidas comparados con los realizados en la P13, las cantidades de escoria como aditivo fueron un poco más generosas, el control de calidad de los agregados se fue más riguroso y los porcentajes de hielo para el reemplazo del agua mejoró, es por esto que las temperaturas para esta fundida se controlaron impidiendo que sobrepasara el umbral de 70°C, esta fundida tuvo un volumen total de concreto de 1560m<sup>3</sup>.



**Figura 37.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F1 P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

El máximo promedio de los datos alcanzado para cada uno de los terminales, solo estuvo al 70% por debajo del umbral máximo de temperatura, los resultados obtenidos para la F1 de P14, son totalmente satisfactorios.

4.5. Encepado pila 14 fase 2

Tabla 8.

Termocuplas en Fase 2, P14.

TERMOCUPLAS EN FASE 1 PILA 13; h:0.6m			
TERMOMETRO	NOMENCLATURA EN PLANO DE TERMOMETROS		
#1	1.1	1.2	
#2	2.1	2.2	2.3
#3	3.1	3.2	3.3

Fuente: Propia del autor, 2019

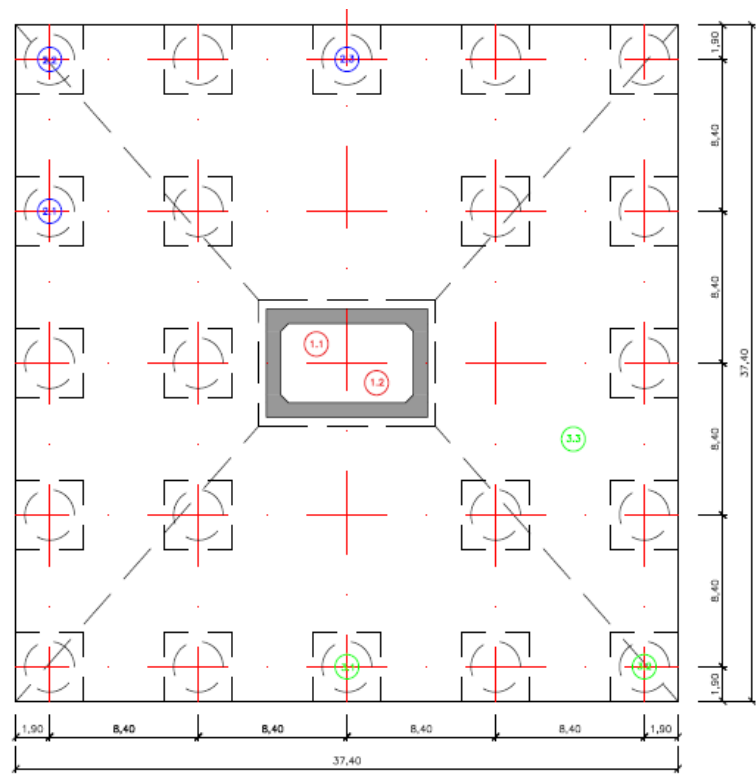
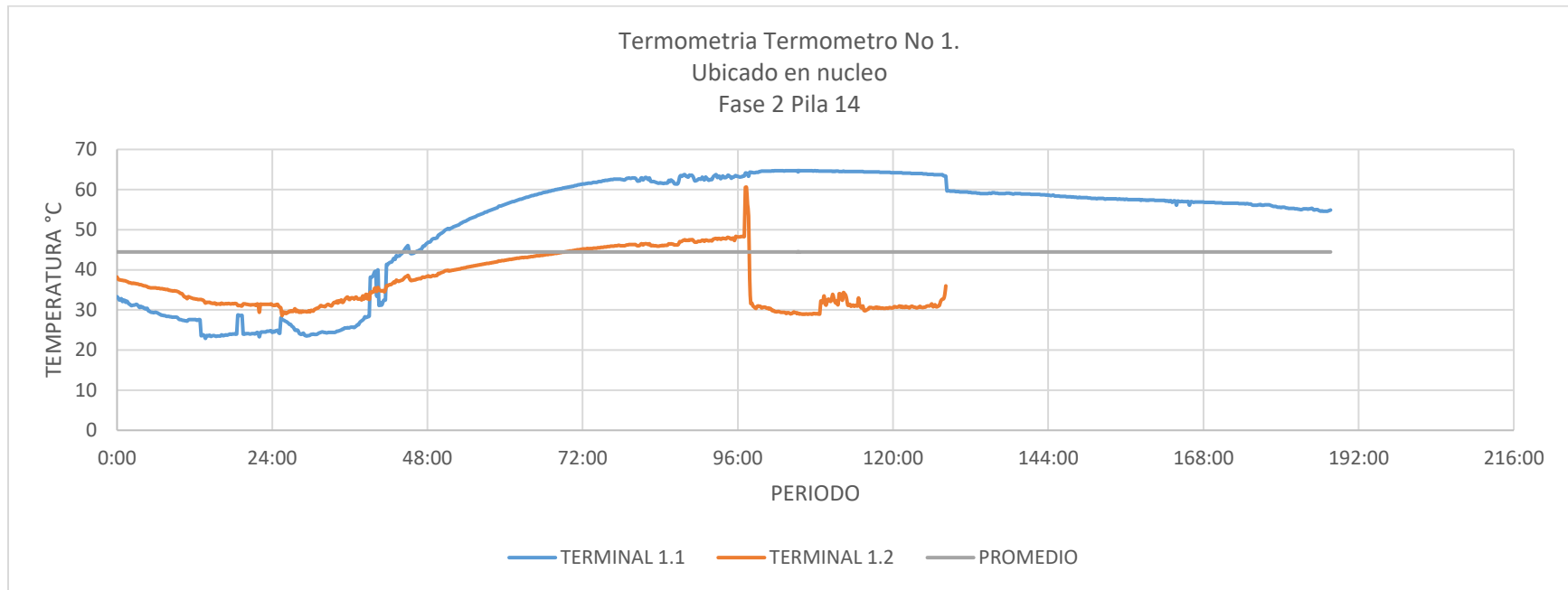
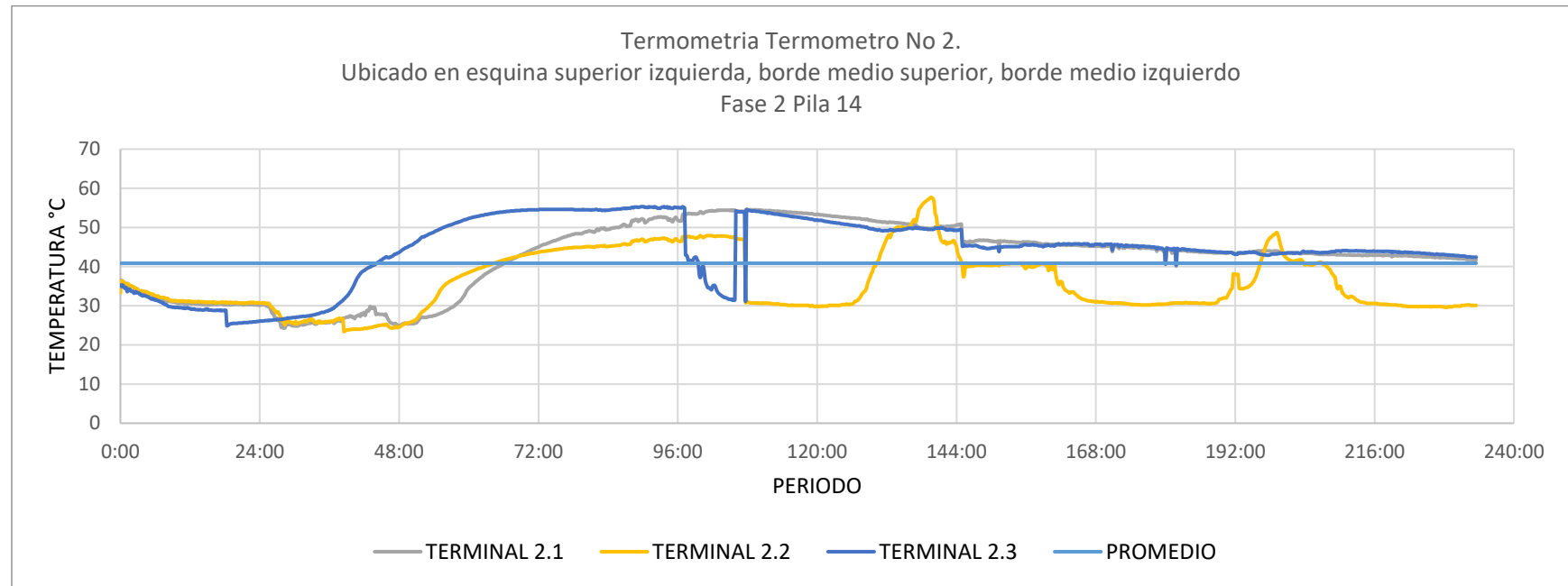


Figura 38. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14 fase 2 (vista en planta). Fuente: Propia del autor, 2019



**Figura 39.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

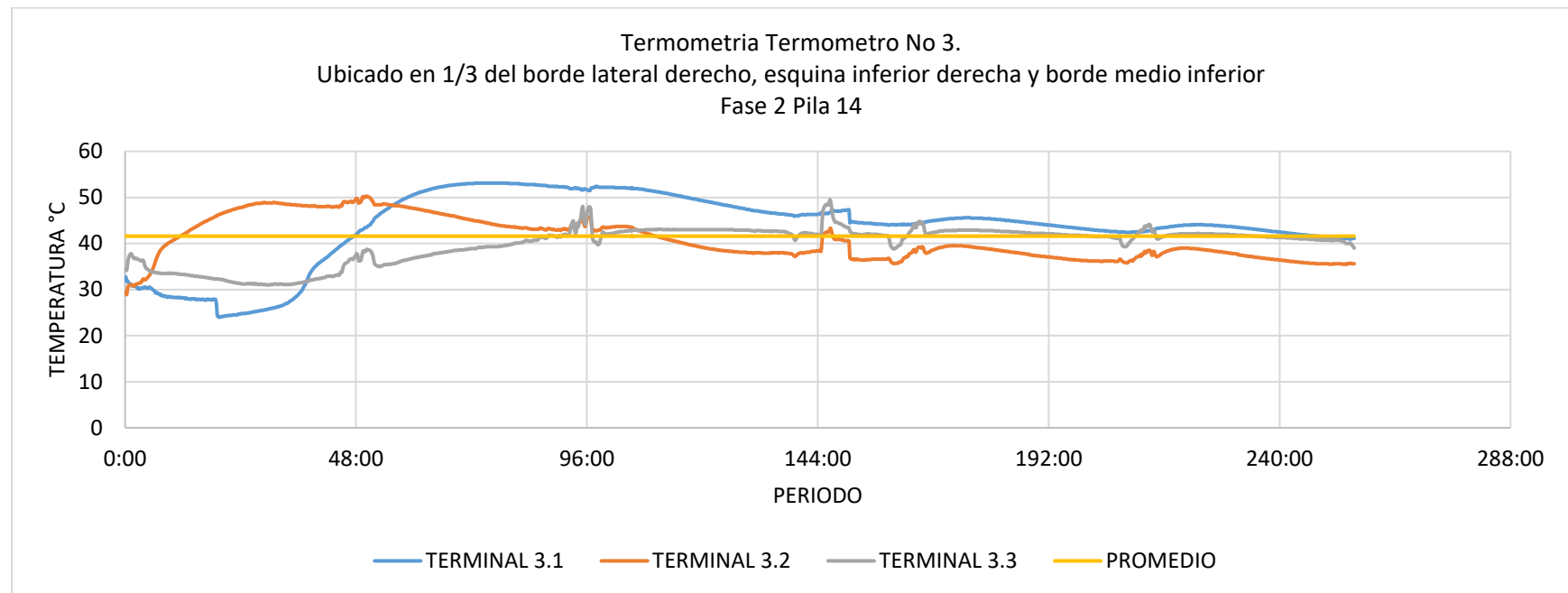
En promedio la temperatura máxima de los terminales instalados en la zona del centro del encepado dio como resultado 62,6°C, el terminal 1.2 solo registro datos por 128h, de 187h. además de esto el terminal 1.2 tuvo una caída de datos a las 97h, creando una gran desviación en cuanto al resultado final. El promedio general obtenido fue de 44,4°C.



**Figura 40.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

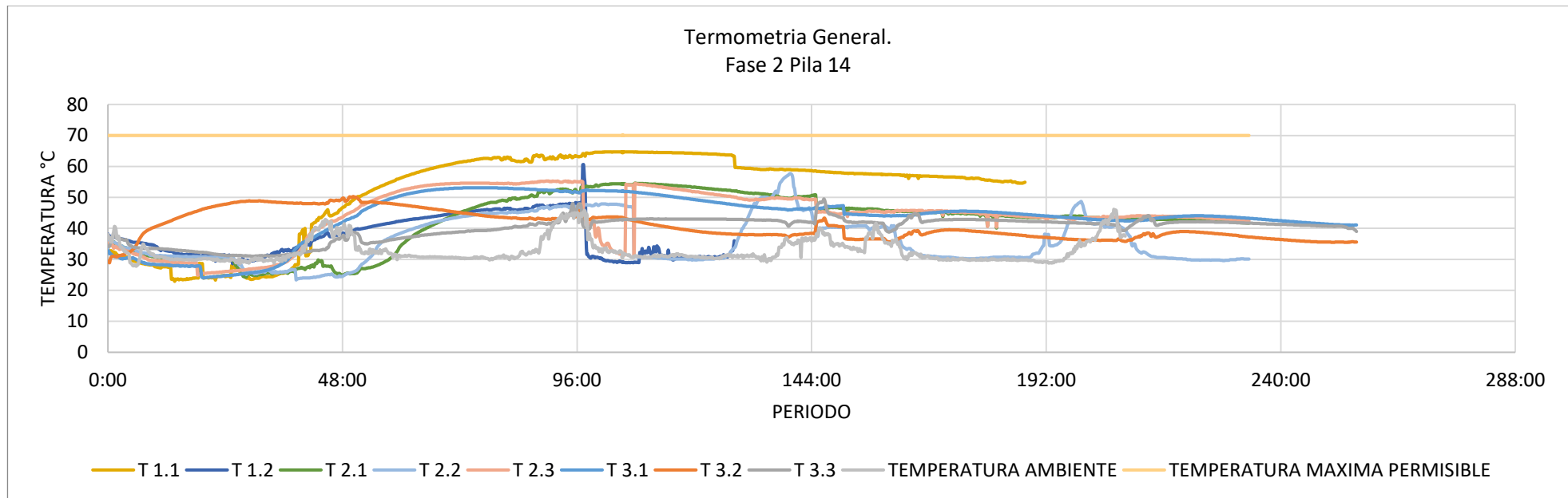
En promedio, la temperatura máxima alcanzada de los 3 terminales principales fue de  $55,8^{\circ}\text{C}$ , el terminal donde la temperatura incrementa más su nivel es el 2.2, con un registro de  $57,7^{\circ}\text{C}$ , se presenta una caída en la temperatura a nivel general entre las 96h y 122h desde el inicio de la fundida, probablemente un error de lectura del termómetro de estos terminales. La temperatura promedio fue de  $40,8^{\circ}\text{C}$ .





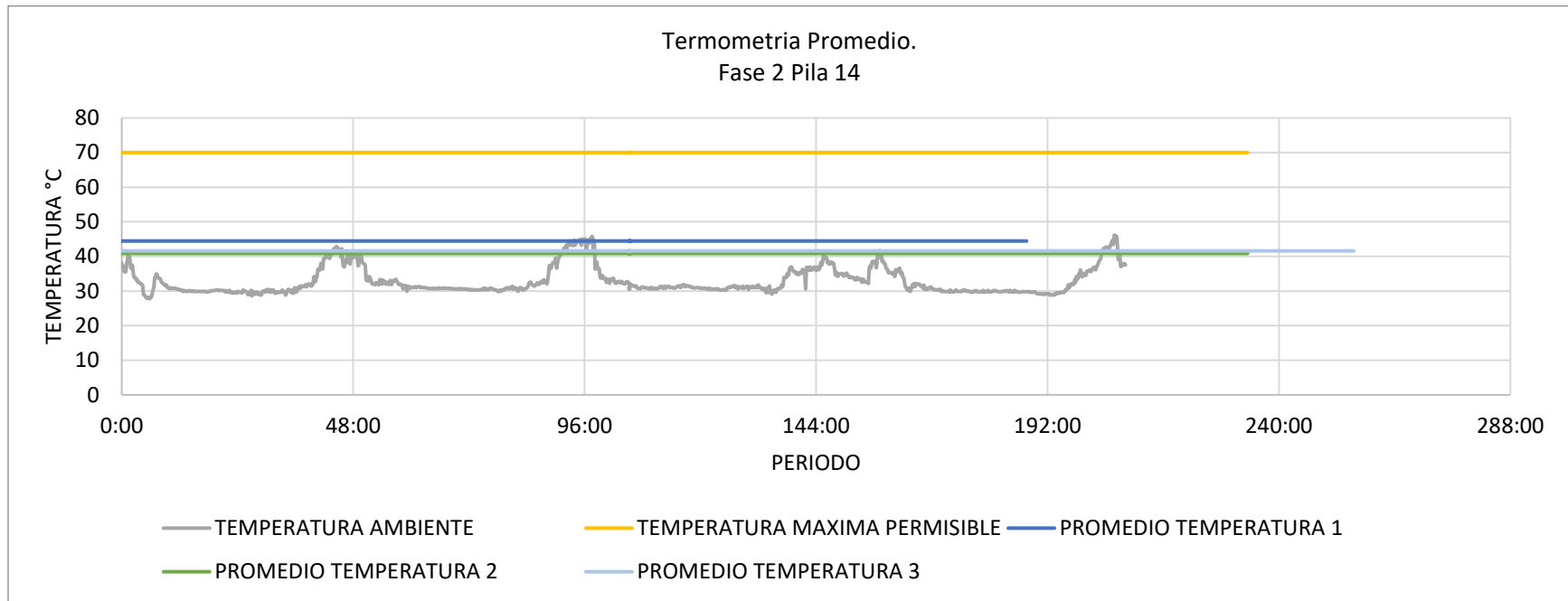
**Figura 41.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Esta grafica correspondiente a los terminales de la zona izquierda, muestra un comportamiento uniforme y que todos sus datos fueron tomados de manera correcta, al no tener ningún tipo de sobresaltos. Las variaciones se presentaron en las horas de mayor incremento en la temperatura ambiente, inicialmente hay un aumento rápido de la temperatura, pero al pasar las horas esto empieza a disminuir gradualmente. La temperatura máxima promedio de los tres terminales fue de 50,9°C.



**Figura 42.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 2, P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Como ya se mencionó en la Grafica 20. Comparado con los resultados de las fundidas de la P13, en esta en ningún caso se supera la temperatura máxima permisible por el mayor control que se tuvo en los vaciados de la P14, al revisar detalladamente cada terminal, es fácil notar que los incrementos y sobresaltos se generan justo cuando la temperatura ambiente tiene variaciones, estas variaciones se presentan en el rango de medio día; que es cuando la temperatura en la ciudad de Barranquilla, alcanza su punto máximo.



**Figura 43.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F2 P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Los resultados promedio de temperaturas para la Fase 2 de P14, estuvieron muy cercanos los unos de los otros, manejando un rango entre 40°C y 44°C, valores que están un 40% por debajo de lo recomendado por la literatura.

4.6. Encepado pila 14 fase 3

Tabla 9.

Termocuplas en Fase 3, P14.

TERMOCUPLAS EN FASE 3 PILA 13; h:2.65m			
TERMOMETRO	NOMENCLATURA EN PLANO DE TERMOMETROS		
#1	1.1	1.2	1.3
#2	2.1	2.2	2.3
#3	3.1	3.2	

Fuente: Propia del autor, 2019

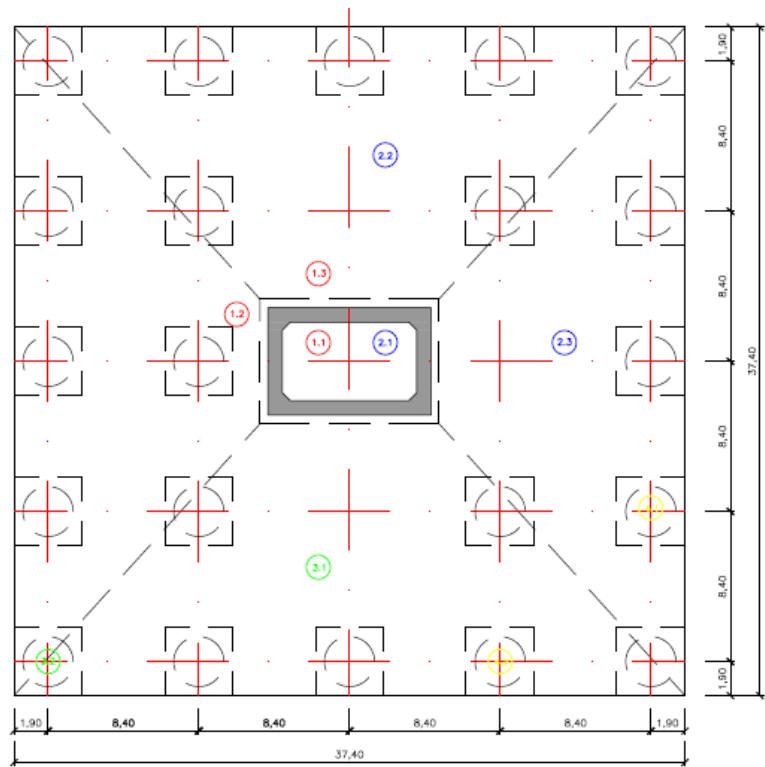
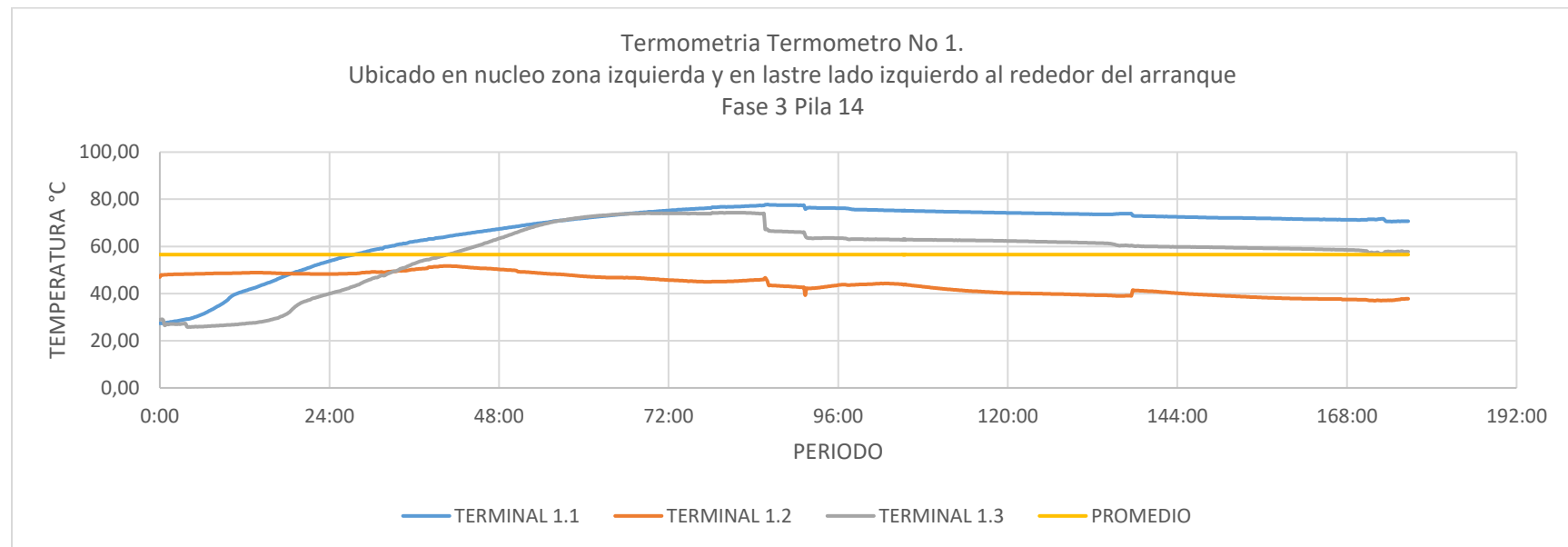
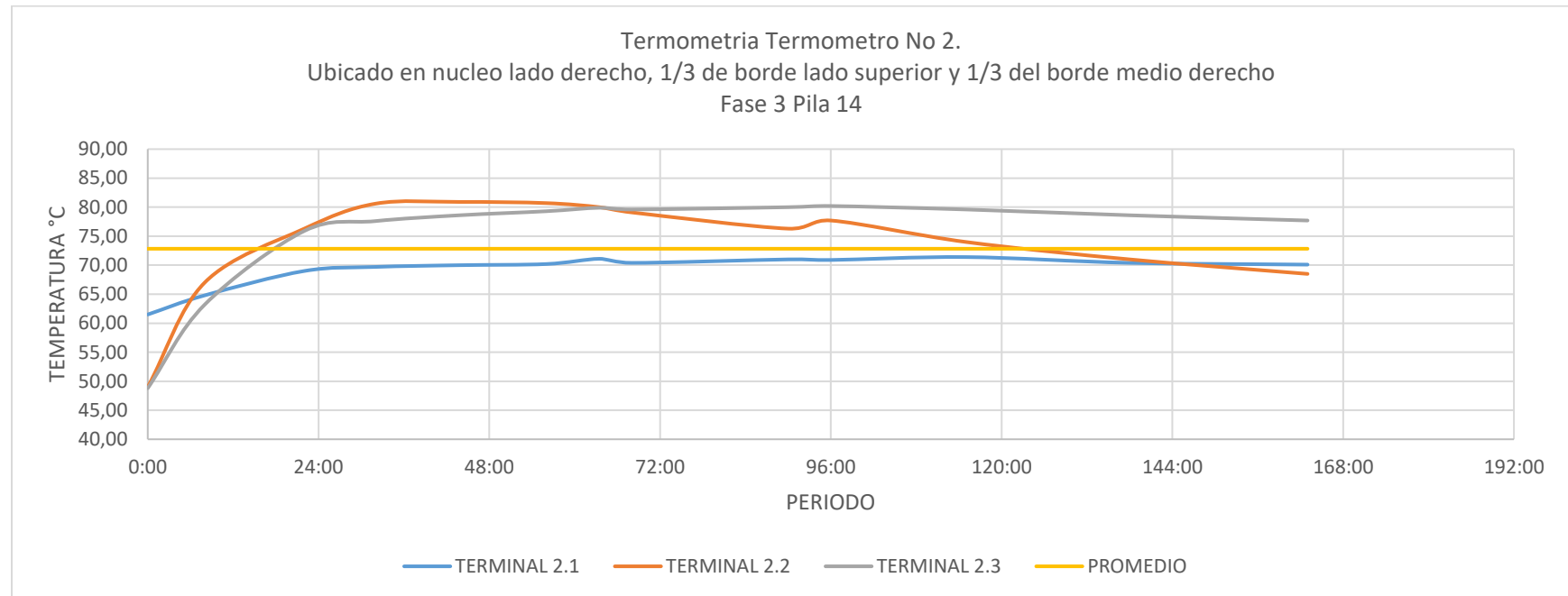


Figura 44. Ubicación termocuplas en encepado Pila 14 fase 3 (vista en planta). Fuente: Propia del autor, 2019.



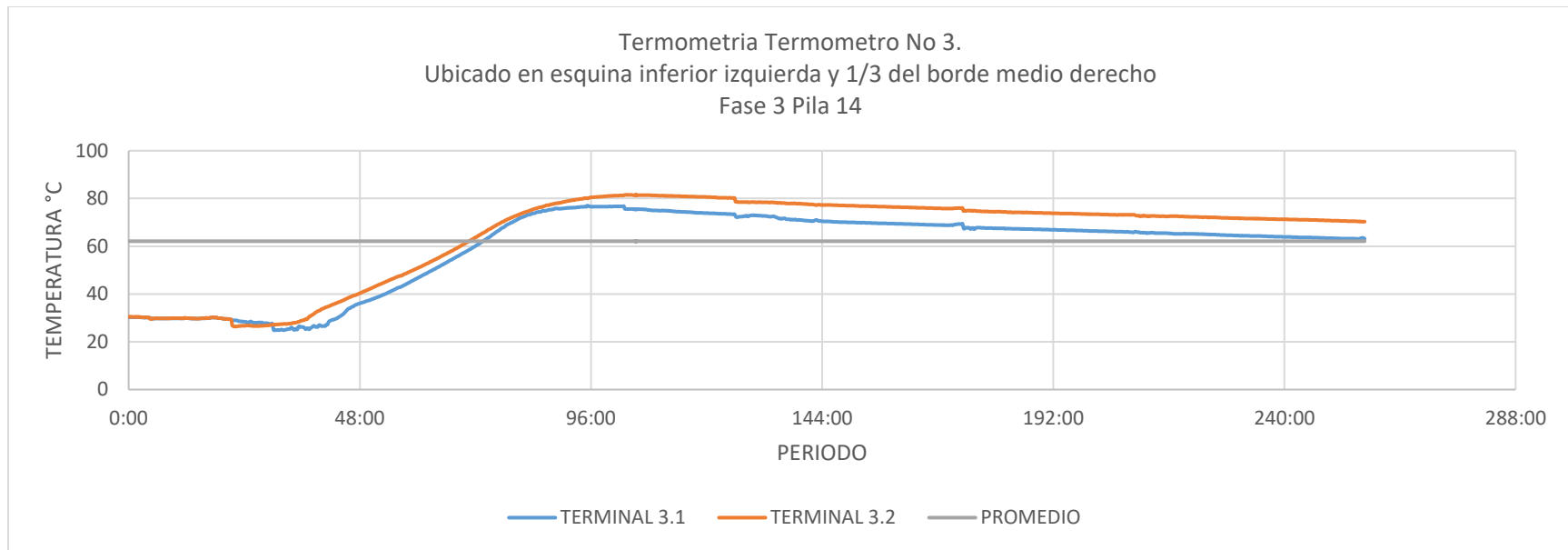
**Figura 45.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #1. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

La fundida de la última fase de la P14, fue hecha el día 22/07/2017, con un total de concreto vaciado de  $2407\text{m}^3$ , como ya se había mencionado en el Grafico 16. Porque estas fundidas incluyen el lastre de los encepados, estas fundidas alcanzaban una media de 3 días de vaciado debido al gran volumen de concreto que se manejaba, las temperaturas alcanzadas también son las mas altas comparadas con las fases anteriores, el terminal 1.1 tuvo registro de temperaturas hasta  $77,8^{\circ}\text{C}$ , la media de las temperaturas máximas alcanzadas fue de  $67,3^{\circ}\text{C}$  y en promedio los tres terminales se manejaron en  $56,5^{\circ}\text{C}$ .



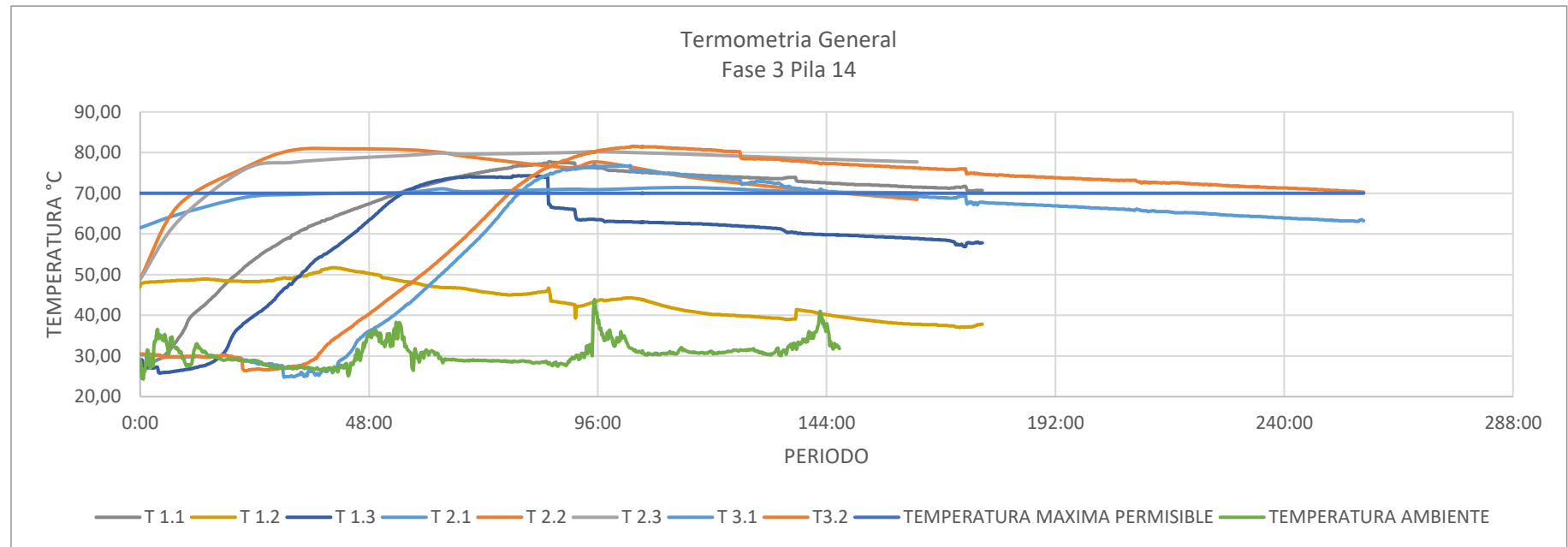
**Figura 46.** . Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #2. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Los terminales dispuestos para el termómetro No 2. Se posicionaron de una manera similar a los utilizados en el termómetro No.1 pero con un poco más de distancia al núcleo del encepado, los resultados mostraron una temperatura mas alta y unos datos mas uniformes sin resaltos muy pronunciados, las temperaturas máximas promedio fueron de 77,5°C, el promedio general de los tres terminales fue de 72,8°C. Superando levemente las temperaturas registradas en el Termómetro No. 1.



**Figura 477.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. Termómetro #3. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

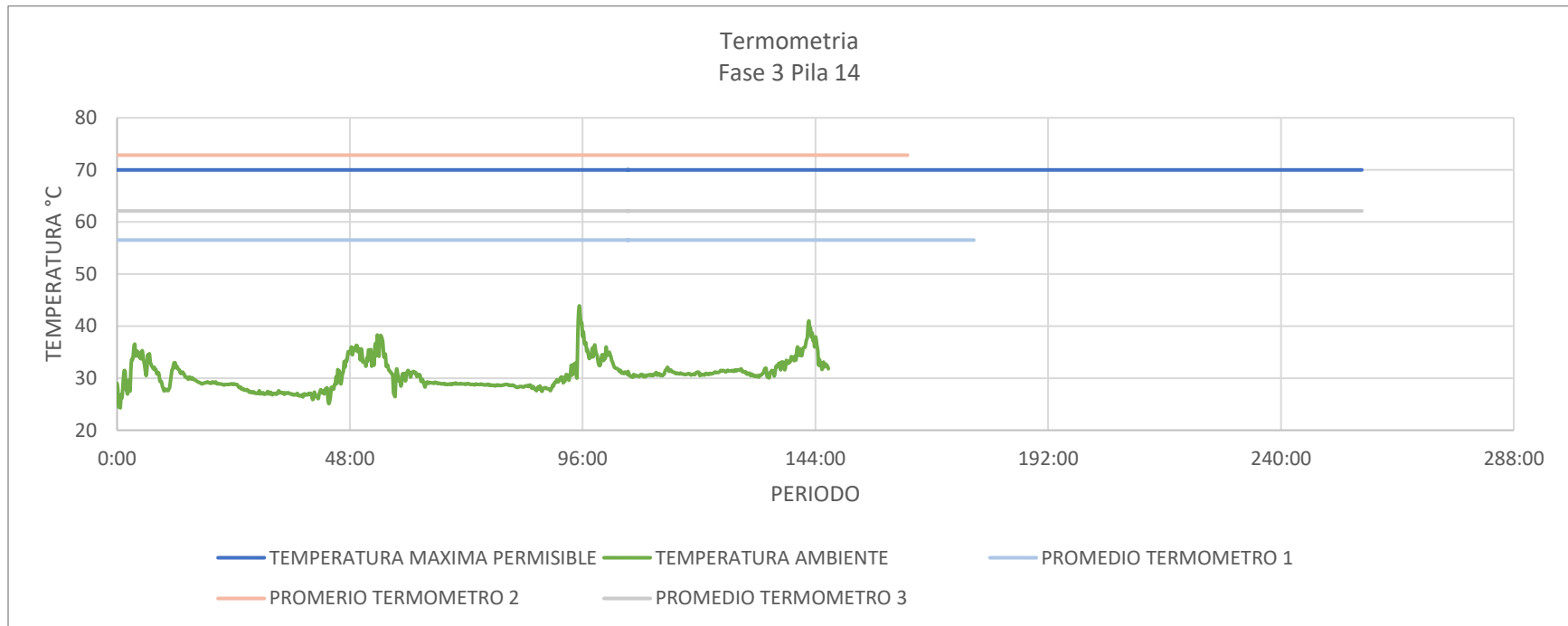
Para abarcar la totalidad del elemento el termómetro 3. Fue ubicado en 2 terminales posicionados en la esquina inferior izquierda y a 1/3 del núcleo del encepado. La grafica se comporta uniformemente y muy parecida al termómetro 1 porque las mediciones de temperatura inician entre los 26°C y los 30°C. Esta medición también supera la máxima temperatura recomendada, pero como ya se dijo anteriormente es de las fundidas con mayores volúmenes y más tiempo de ejecución. La temperatura máxima promedio alcanzada fue de 79,3°C, el terminal 3.2 fue el que registro la mayor temperatura en este punto 81,6°C y en promedio alcanzado fue de 62.1°C.



**Figura 48.** Evolución de la temperatura con respecto al tiempo en Fase 3, P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

En general, el terminal 3.2 fue el que mas temperatura alcanzo comparado con los otros, en proporción este terminal contrastado con la temperatura ambiental aumenta un 43,8%, como ya se mencionó, el umbral de temperatura máxima permisible fue superado por su alto volumen de concreto y la duración de la fundida. Los DATALOGGERS instalados no presentaron inconvenientes por lo que su medición fue constante y todos los terminales recopilaron los datos hasta las horas establecidas.



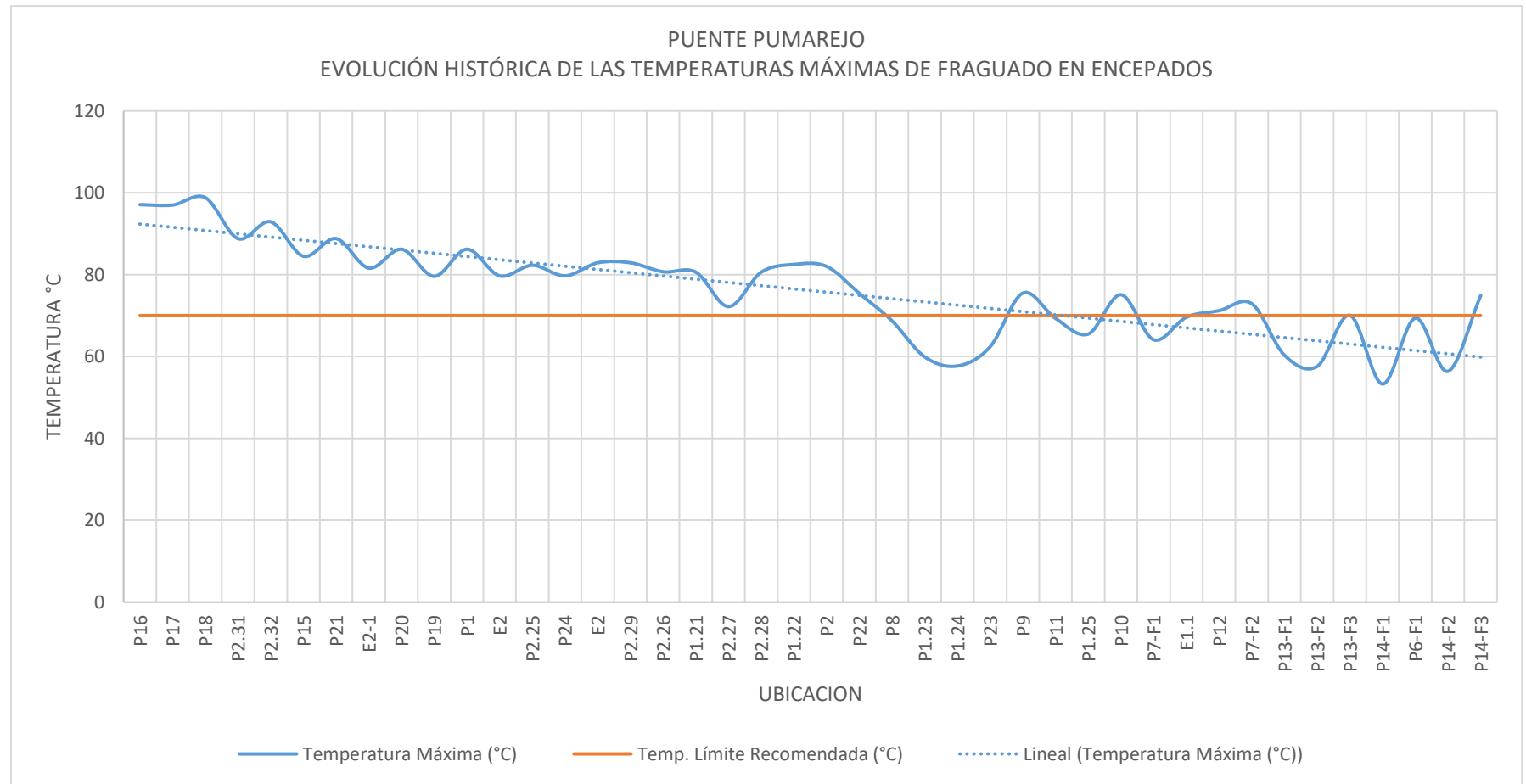


**Figura 49.** Promedio de temperaturas máximas alcanzadas para termometría de F3 P14. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Aunque el termómetro 3 alcanzara las máximas temperaturas registradas, en promedio el termómetro 2 fue más constante en su temperatura por lo que es este quien alcanza una mayor temperatura promedio, 72,8°C.

#### **4.7. Evolución de temperatura en los encepados del nuevo Puente Pumarejo**

El proceso de medición de temperaturas en las pilas principales del nuevo Puente Pumarejo fue tan riguroso y de tanta importancia porque la interventoría del proyecto, Consorcio Vial Pumarejo, no estaba conforme con los resultados obtenidos de la temperatura de colocación del concreto en los primeros encepados realizados, y con las temperaturas máximas obtenidas. Porque se presentaron fisuras térmicas en los encepados de las pilas P16, P17, P18, P2.31, P2.33 y P15, las adiciones de ceniza fueron supremamente bajas y no contribuían con la disminución de la temperatura en las mezclas, ni en su estado plástico, ni en estado endurecido. A partir de aquí la ejecución de estos elementos fue de mayor cuidado para cumplir con la normativa y que los elementos cumplirán con cada requerimiento. El método de vaciado también cambio, los vaciados posteriores a la fundida del encepado de P15, se empezaron hacer por capas horizontales que fueron llenando de manera homogénea toda la superficie horizontal del encepado, así se garantizó que la temperatura interior de la masa de concreto no tuviera diferenciales térmicos importantes entre capas. La temperatura de colocación también fue revisada con detenimiento para que no superara los 20°C. También se mejoró la protección y el curado de los elementos para evitar diferenciales térmicos entre la masa y el medio ambiente, en especial las dos primeras semanas después de las fundidas. Aunque las medidas se empezaron a tomar después de las fundidas de los elementos ya mencionados, las mejoras se presentaron desde diciembre del 2016. A continuación, se gráfica y se muestra a detalle la evolución de las temperaturas máximas alcanzadas.



**Figura 50.** Evolución histórica de las temperaturas máximas en los encepados del Nuevo Puente Pumarejo. **Fuente:** Propia del autor, 2019.

Esta grafica muestra a lo largo las temperaturas máximas alcanzadas en los elementos con concreto masivo del nuevo Puente Pumarejo, específicamente en los encepados. Se empezó a llevar registros de la temperatura en la fundida de la P16, el día 03/02/2016, que alcanzo una preocupante máxima temperatura de  $97,1^{\circ}\text{C}$ , a partir de aquí se iniciaron las medidas para registrar, reducir y controlar la temperatura con la que el concreto salía de planta y la temperatura con la que el concreto hacia su disposición final en el elemento a fundir, a partir de la fundida de P15, el día 19/04/2016 se tuvo una reducción de la temperatura (comparada con la original de P16) del 13%, las medidas preventivas que se implementaron ayudaron a que la disminución del mes 02 al mes 04 del año 2016, fuera notable, a partir de este punto las máximas temperaturas alcanzadas en los encepados hasta llegar al punto de estudio de esta investigación redujeron notablemente los valores orígenes, dando como resultado que en su mayoría, las temperaturas máximas alcanzadas estuvieran por debajo de lo que la literatura nos recomienda que el concreto debe estar,  $70^{\circ}\text{C}$

**Tabla 10.***Temperaturas máximas alcanzadas en encepados del Nuevo Puente Pumarejo.*

ENCEPADO	FECHA	Temperatura Máxima (°C)	Temp. Límite Recomendada (°C)
P16	2016/03/02	97,1	70
P17	2016/03/11	97	70
P18	2016/03/20	98,8	70
P2.31	2016/03/28	88,8	70
P2.32	2016/04/01	92,9	70
P15	2016/04/19	84,5	70
P21	2016/04/23	88,8	70
E2-1	2016/04/25	81,6	70
P20	2016/06/04	86,2	70
P19	2016/06/11	79,6	70
P1	2016/08/06	86,2	70
E2	2016/08/27	79,7	70
P2.25	2016/09/03	82,3	70
P24	2016/09/09	79,7	70
E2	2016/09/21	82,9	70
P2.29	2016/09/27	82,9	70
P2.26	2016/09/29	80,7	70
P1.21	2016/10/11	80,6	70
P2.27	2016/10/13	72,2	70
P2.28	2016/10/18	80,6	70
P1.22	2016/11/15	82,5	70
P2	2016/11/28	82	70
P22	2016/12/18	75,4	70
P8	2016/12/20	68,7	70
P1.23	2017/01/05	59,9	70
P1.24	2017/01/14	57,7	70
P23	2017/02/01	62,4	70
P9	2017/02/09	75,5	70
P11	2017/02/15	69,3	70
P1.25	2017/02/20	65,5	70
P10	2017/03/01	75,1	70
P7-F1	2017/03/13	64,1	70
E1.1	2017/03/17	69,6	70
P12	2017/03/23	71,2	70
P7-F2	2017/03/29	72,9	70
P13-F1	2017/05/01	60,3	70
P13-F2	2017/05/13	57,6	70
P13-F3	2017/06/10	70,06	70
P14-F1	2017/06/17	53,3	70
P6-F1	2017/06/20	69,4	70
P14-F2	2017/07/02	56,4	70
P14-F3	2017/07/22	74,9	70

*Fuente:* Propia del autor, 2019

### Conclusiones

La realización de ensayos en los concretos masivos radica su importancia en la determinación de la temperatura máxima del elemento. Con esto se minimiza las fisuras y agrietamientos, lo que permite demostrar el objetivo y finalidad del estudio realizado. Además, ayuda a determinar el porcentaje de hielo, al inicio no se instrumentaba, no se conocía el porcentaje de hielo, es decir; el requerido en el diseño de la mezcla del concreto. La temperatura del concreto también tiene relación con la cantidad de cemento, y de otros agregados tales como escoria y ceniza, la geometría del elemento define la disipación el calor.

El cemento utilizado en la construcción del nuevo Puente Pumarejo es un cemento de alta resistencia inicial y con un elevado desprendimiento de calor de hidratación, se propone disminuir el contenido de este tipo de cemento, mediante el incremento de la adición de ceniza o escoria. Este cambio; la introducción de ceniza en compañía con el hielo en la mezcla como reemplazo parcial del agua de mezclado, produce una reducción de la relación agua/material cementante. A pesar de trabajar con un contenido mayor de cementante, se tiene como resultado la disminución de las temperaturas tanto en la colocación como en la máxima obtenida, demostrando las bondades de utilizar hielo en una alta proporción para disminuir estas temperaturas.

En los resultados obtenidos, las horas donde el concreto aumentaba más su temperatura eran las más cercanas a los medios días hasta las 3:00 pm, es aquí donde la temperatura ambiente también en todos los casos es mayor.

La evaluación termodinámica del concreto, en especial, en concretos masivos ayuda al control de la resistencia del concreto in situ, determina los tiempos de fraguado en los elementos estructurales de concreto, control por desempeño y prevención de fisuración por causa térmica,

análisis de la temperatura ambiente sobre los concretos masivos, mejora de la gestión y logística para llevar a cabo los vaciados en el concreto masivo.

Es muy importante mencionar que este proyecto donde se realiza el estudio es muy particular, como ya se dijo en los análisis de los resultados, en algunos puntos de la medición del nuevo Puente Pumarejo sobrepasa los valores recomendados por literatura, por lo que es necesario ponderar las dimensiones del proyecto, la nueva estructura conlleva elementos de enorme magnitud. Será de los puentes más grandes de Latinoamérica y hay cosas singulares en él por lo que las fórmulas y procedimientos se ajustan en la marcha.

### **Recomendaciones**

- En obras de gran magnitud, tal como la de este proyecto, se debe garantizar la Durabilidad de las estructuras, controlando todos los factores que puedan afectarla o reducirla.
- En Concretos Masivos es fundamental el Control de Temperatura en el elemento, durante el vaciado y posteriormente en el curado.
- Minimizar la generación de agrietamientos o fisuras por la expansión térmica y posterior encogimiento al enfriarse.
- Las temperaturas sobre los 90°C pueden causar reducción o demora en la resistencia del concreto.



### Referencias

ACI. (2007). Specification for Hot Weather Concreting. En A. C. 305, *ACI 305.1-06* (pág. 12).

Estados Unidos: American Concrete Institute, Farmington Hills.

ACI116, C. (2006). Terminología del cemento y el hormigón. *Terminología del cemento y el hormigón*.

ACI301-10. (2010). *Specifications for Structural Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ACI305.1-06 (2007). *Specifications for Hot weather concreting*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, IV edición 2007

AASHTO Bridge Security Guidelines.

AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design II Edition 2011.

Aguas Medina, D. d., Peña Coronado, K. E., & Ospino Árias, J. C. (2017). El canal navegable del Rio Magdalena y las sinergias para el desarrollo de Barranquilla. . *Dimensión Empresarial*, 15 (2), 211-240.

Bamonte, P., & Gambarova, P. (2010). Properties of Concrete Subjected to. *Journal of Structural Fire Engineering*, 47-61.

Barreda, M., Iaiani, C., & Sota, J. D. (2000). Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: Tramo experimental de un pavimento de hormigón. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, 1145-1150.

- Borrajo Pérez, R., González Bayón, J. J., & Sánchez Rodríguez, A. (2012). Modelación del proceso de calcinación flash durante la activación de arcillas. *Ingeniería Mecánica. Vol. 15. No. 1*, 73-82.
- Calavera, J. (2015). El aumento de temperatura del hormigón durante los primeros días a partir del vertido. *Hormigón y Acero*, 84 - 85.
- Cámara, A., & Astiz, M. Á. (2014). Aplicabilidad de las diversas estrategias de análisis sísmico en puentes atirantados en rango elástico. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. 30 (1)*, 42-50.
- Carillo Alonso, L., & Astiz Suárez, M. Á. (2015). Introducción de errores aleatorios en el proceso de instalación de los cables en los puentes atirantados. *Hormigón y Acero. Vol. 66 N° 277*, 203-224.
- Conrado, T., & San jose, A. (2016). *PERCEPCIÓN DE LOS FACTORES INFLUYENTES EN LA CALIDAD DEL*. Barranquilla: INGECUC.
- Fernandez Canovas, M. (1991). Influencia de la temperatura de curado sobre la evolución de las resistencias a compresión de hormigones fabricados con distintos tipos de cementos. *Materiales de construcción, Vol 41, N°222*, 37-46.
- Fernández Troyano, L., Ayuso Calle, G., & Fernández Muñoz, L. (2016). Distintos sistemas de aislamiento empleados en puentes. *Hormigón y Acero*, 1-11.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2016.09.003>
- ACI. (2007). Specification for Hot Weather Concreting. En A. C. 305, *ACI 305.1-06* (pág. 12). Estados Unidos: American Concrete Institute, Farmington Hills.

ACI116, C. (2006). Terminología del cemento y el hormigón. *Terminología del cemento y el hormigón*.

ACI301-10. (2010). *Specifications for Structural Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

Aguas Medina, D. d., Peña Coronado, K. E., & Ospino Árias, J. C. (2017). El canal navegable del Rio Magdalena y las sinergias para el desarrollo de Barranquilla. . *Dimensión Empresarial*, 15 (2), 211-240.

Bamonte, P., & Gambarova, P. (2010). Properties of Concrete Subjected to. *Journal of Structural Fire Engineering*, 47-61.

Barreda, M., Iaiani, C., & Sota, J. D. (2000). Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: Tramo experimental de un pavimento de hormigon. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga*, 1145-1150.

Borrajó Pérez, R., González Bayón, J. J., & Sánchez Rodríguez, A. (2012). Modelación del proceso de calcinación flash durante la activación de arcillas. *Ingeniería Mecánica*. Vol. 15. No. 1, 73-82.

Calavera, J. (2015). El aumento de temperatura del hormigón durante los primeros días a partir del vertido. *Hormigón y Acero*, 84 - 85.

Cámara, A., & Astiz, M. Á. (2014). Aplicabilidad de las diversas estrategias de análisis sísmico en puentes atirantados en rango elástico. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 30 (1), 42-50.

- Carillo Alonso, L., & Astiz Suárez, M. Á. (2015). Introducción de errores aleatorios en el proceso de instalación de los cables en los puentes atirantados. *Hormigón y Acero*. Vol. 66 N° 277, 203-224.
- Conrado, T., & San jose, A. (2016). *PERCEPCIÓN DE LOS FACTORES INFLUYENTES EN LA CALIDAD DEL*. Barranquilla: INGECUC.
- Código Colombiano de diseño sísmico de puentes (CCDSP), VI edición 2011.
- Especificaciones generales de construccion de carreteras del Invias.
- Fernandez Canovas, M. (1991). Influencia de la temperatura de curado sobre la evolución de las resistencias a compresión de hormigones fabricados con distintos tipos de cementos. *Materiales de construcción*, Vol 41, N°222, 37-46.
- Fernández Troyano, L., Ayuso Calle, G., & Fernández Muñoz, L. (2016). Distintos sistemas de aislamiento empleados en puentes. *Hormigón y Acero*, 1-11.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2016.09.003>
- Garín, L., Santilli, A., & Pejoja, E. (2012). Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, núm. 10 -ISSN 1510-7450 • ISSN (en línea) 1688-9584, 109-114.
- Garin, L., Santillini, A., & Pejoja, E. (2012). Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigon. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*.
- Herrera, R. N. (2011). Adecuada aplicacion del contro termico y de madurez del concreto (calorimetrias del concreto) en la determinacion de tiempos de desmolde y descimbre en vivienda. 20.

- Juan, M. (2012). Influencia de la Temperatura Ambiental sobre la resistencia del hormigón preparado. *Ciencias aplicadas*; 624 - *Ingeniería civil y de la construcción en general*, 23-37.
- Lopez, L. G. (2003). *EL CONCRETO Y OTROS MATERIALES PARA LA CONSTRUCCION*. Manizales: UNIVERSIDAD NACIONAL.
- Martínez Galván, S. A., & Romo Organista, M. P. (2013). Capacidad de carga tridimensional de celdas estructuradas apoyadas en suelo cohesivo: método de análisis simplificado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XIV, N°3, 399-412.
- Merritt, F. S. (1993). *Manual del Ingeniero Civil*. Gran Bretaña: McGraw Hill.
- Muñoz, E., & Gómez, D. (2013). Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. *Revista de Ingeniería de Construcción RIC*. Vol. 28 N°1, 37-62.
- NSR-10. (2010). *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente*. Bogota: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ortiz Lozano, J. A., Aguado de Cea, A., Zermeño de León, M. E., & Alonso Farrera, F. A. (2007). Influencia de la temperatura ambiental en las propiedades del concreto hidráulico. *Ingeniería* 11-2, 13-20.
- Ortiz, J., Aguado, A., Agullo, L., Garcia, T., & Zermeño, M. (2008). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Bases teóricas. *Materiales de Construcción* Vol. 58, 7-22.
- Pacheco Bustos, C. A., Fuentes Pumarejo, L., Sánchez Cotte, É., & Rondón Quintana, H. (2017). Residuos de construcción y demolición (RCD), una perspectiva de aprovechamiento para

la ciudad de barranquilla desde su modelo de gestión. *Ingenieria y Desarrollo*. Vol. 35 N°2, 533-555.

Padilla, J. (2014). *Contrato 2200 – Diciembre 2011 para la complementación de los estudios y diseños definitivos (fase III) para la Solución Integral del paso sobre el Río Magdalena en Barranquilla*. Barranquilla: VOLUMEN No. VIII: ESTUDIO Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS.

Páez Moreno, D. F., Leal Moreno, V. E., & Restrepo Burgos , M. (2009). INFLUENCIA DE LOS CICLOS HIELO-DESHIELO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO (CASO TUNJA). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, No. 15 especial, 95-110.

Palomino, J. (2014). *GUIA PARA SUPERVISIÓN TÉCNICA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO*. Cartagena: Universidad de Cartagena.

Quimbay Herrera, R. N. (2009). "ADECUADA APLICACION DEL CONTROL TERMICO Y DE MADUREZ DEL CONCRETO (CALORIMETRIAS DEL CONCRETO) EN LA DETERMINACION DE TIEMPOS DE DESMOLDE Y DESCIMBRE EN VIVIENDA".

Quintana Ytza, M. F. (2009). Metodos Constructivos de Puentes Atirantados - Estudio de la Distribucion de Fuerzas en los Tierantes. *Memoria de Trabajos de Difusion Cientifica y Tecnica*, 13-28.

Ramírez, L. C. (2008). *El Concreto Masivo*. Ciudad de Mexico: PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA.

Ramírez, L. C. (Enero de 2008). *El Concreto Masivo*. Ciudad de Mexico: PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA.

Reglamento colombiano de construcción sismorresistente NSR10 decreto 926 de marzo 19 de 2010.

Rhodes, J. A. (1978). Propiedades térmicas: Importancia de las pruebas y propiedades del hormigón y materiales para la fabricación de hormigón. *STP-169B, ASTM International, West Conshohocken, Pa.*, 242-266.

Roa Rodríguez, G., Aperador Chaparro, W., & Delgado Tobón, E. (2015). Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. *Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol. XVI N° 4*, 565-572.

Ruiz Guerrero, J. (Junio de 2011). *Repositorio Tec* . Obtenido de Repositorio Institucional del Tecnológico de Costa Rica: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6791>

Sima, F., & Knut, S. (2014). Evolución de los Puentes Atirantados. *FIRST INTERNATIONAL BRIDGES CONFERENCE - CHILE 2014, FUTURE CHALLENGES: DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE*, (págs. 1-8). Santiago - CHILE. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Fernando\\_Sima/publication/315825341\\_Evolucion\\_de\\_los\\_Puentes\\_Atirantados/links/58e8f4c4aca2729d8cd2acee/Evolucion-de-los-Puentes-Atirantados.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Sima/publication/315825341_Evolucion_de_los_Puentes_Atirantados/links/58e8f4c4aca2729d8cd2acee/Evolucion-de-los-Puentes-Atirantados.pdf)

Solet Salamero, G. (2012, Febrero). Tesis: Puentes de Fortuna. Universidad Politécnica de Catalunya.

Solis Carcaño, R., & I. Moreno, E. (2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. *Ingeniería* 9-3, 5-17.

Solis Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.*, Vol. 21, N° 3, 57-68.

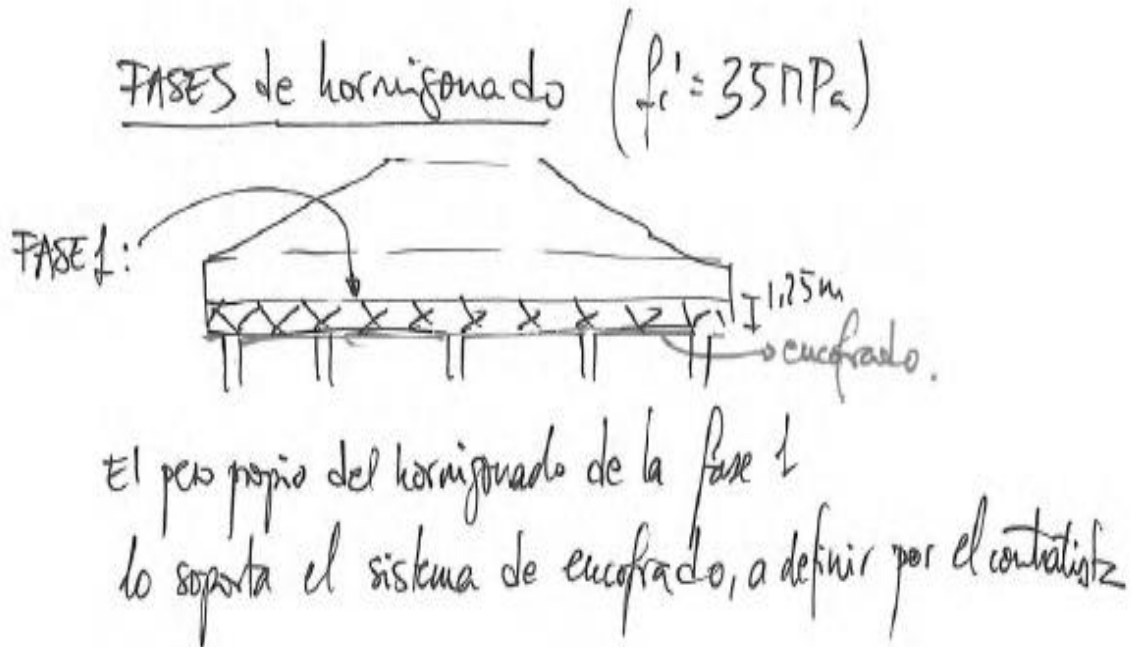
Toirac Corral, J. (2004). Patología de la construcción. Grietas y Fisuras en obras de Hormigón. Origen y Prevención. . *Ciencia y Sociedad*. Vol. XXIX, N°1, 72-114.

Varona, F. B., Baena, F. J., & Ivorra, S. (2017). Estudio de las propiedades mecánicas residuales de hormigones expuestos a altas temperaturas. *Hormigón y Acero*, 1-7.

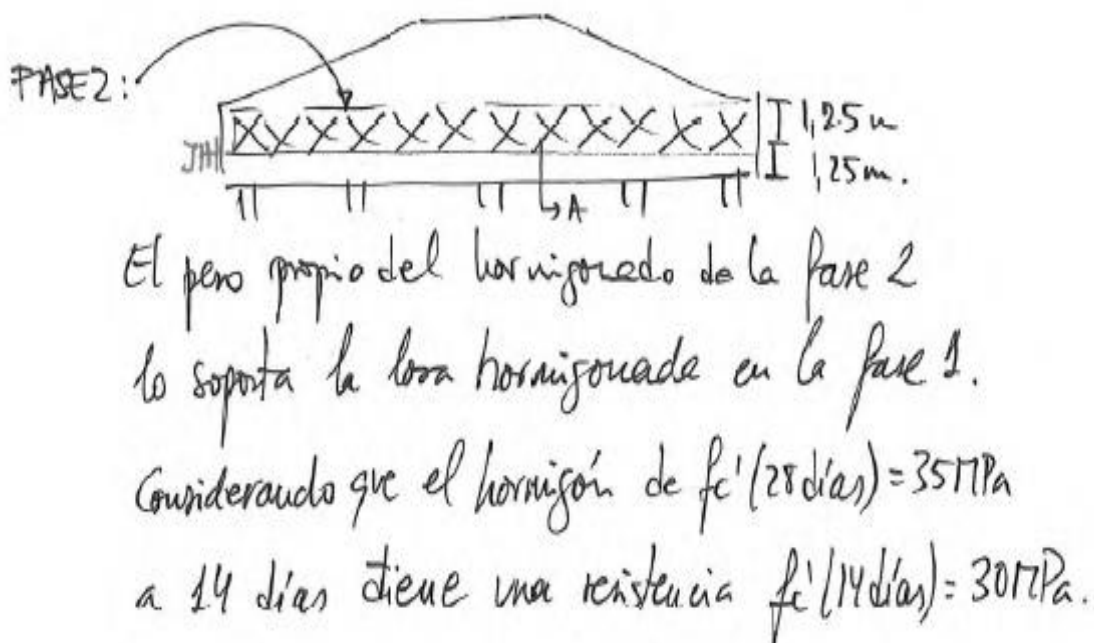


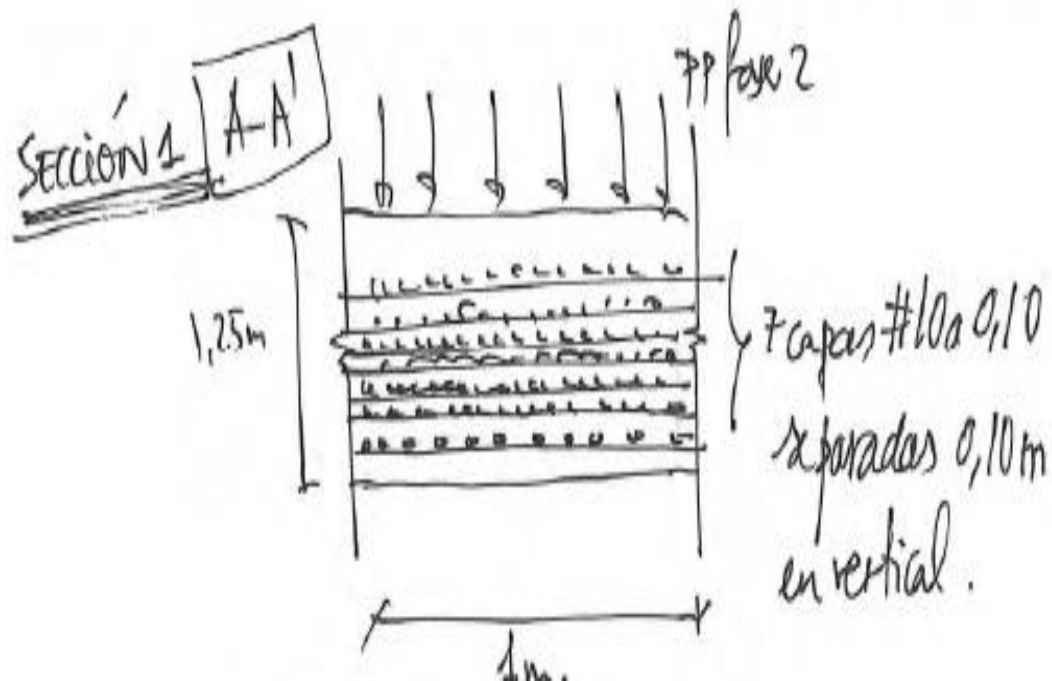
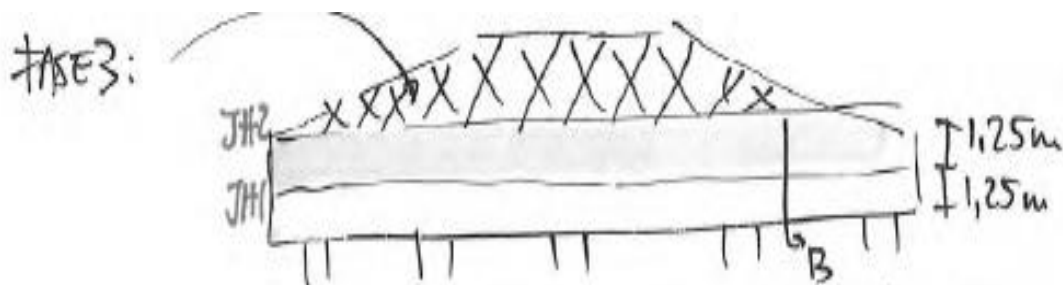
## Anexos

## Anexo 1. Diseño de Fase 1 en P13 Y P14.

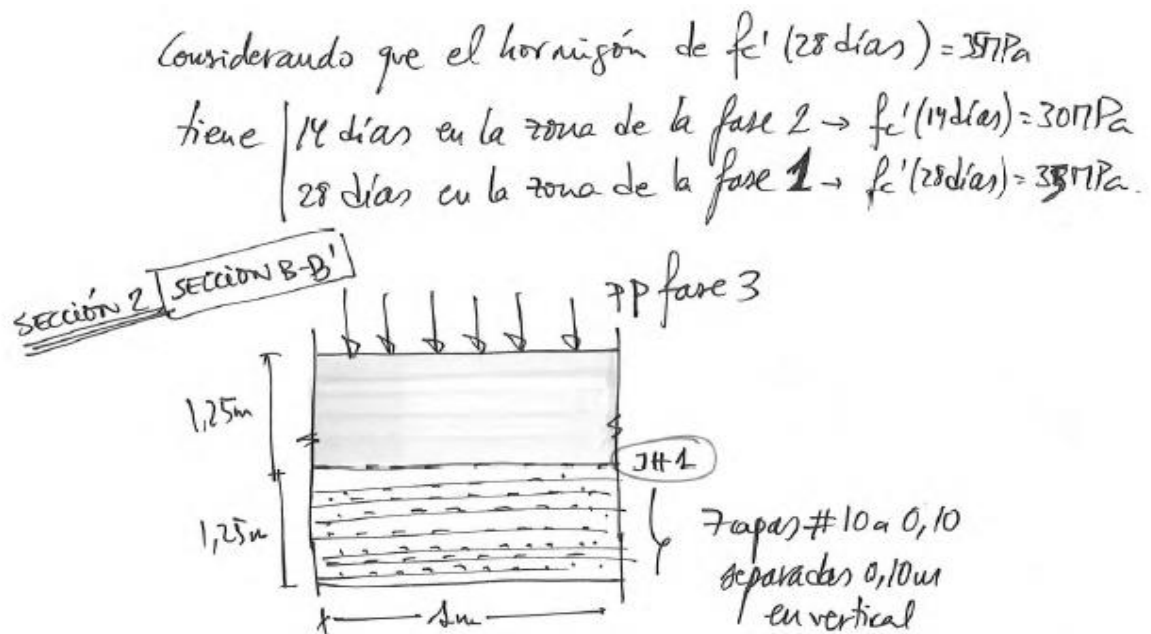


## Anexo 2. Diseño de Fase 2 en P13 y P14



**Anexo 3. Diseño de refuerzo en junta de Fas2 en P13 y P14.****Anexo 4. Diseño de Fase 3 en P13 Y P14.**

El peso propio del hormigonado de la fase 3  
lo soporta la losa hormigonada en las fases 1 y 2

**Anexo 5. Diseño de refuerzo en junta de Fase 3 en P13 y P14.****Anexo 6. Cabeza de pilotes P14**

**Anexo 7. Armado de encepado en P14**



**Anexo 8. Inicio de fundida encepado, P13.**





**Anexo 9. Fundida en turno nocturno encepado P14.**



**Anexo 10. Finalización de fundida encepado, P13.**



**Anexo 11. Dado para prueba medición de temperatura.**



**Anexo 12. Apuntalamiento de encofrado para dado de prueba**





**Anexo 13. Vaciado de concreto para medición de su temperatura.**



**Anexo 14. Posicionamiento de termocuplas**



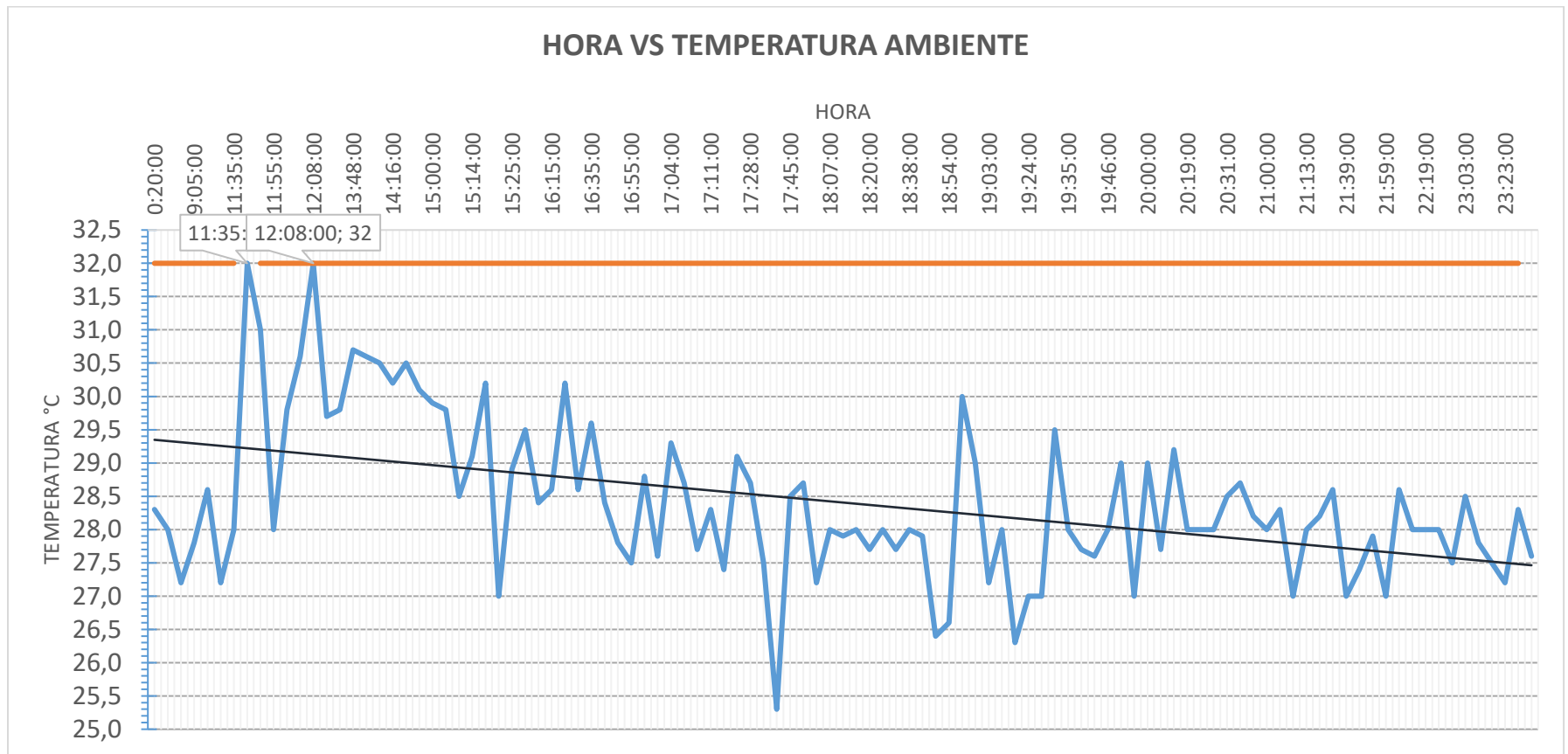
**Anexo 15. Terminales verdes y amarillos para medición con DATALOGGER**



**Anexo 16. Descarga de datos desde DATALOGGER.**





**Anexo 17. Evaluación de temperatura ambiente.**

**Anexo 18. Planta de concreto proyecto Nuevo Puente Pumarejo****Anexo 19. Utilización de hielo en planta de concreto.**